

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
SISTEMA DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
POSGRADO EN GEOLOGIA

**MOVILIDAD DEL MANGANESO, HIERRO Y ARSÉNICO EN EL AGUA SUBTERRÁNEA  
DEL DISTRITO DEL AMPARO Y ALREDEDORES, LOS CHILES, ALAJUELA, COSTA  
RICA.**

Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado  
de Geología para optar al grado y título de Maestría Académica en Hidrogeología y  
Manejo de Recursos Hídricos

MARCOS ALBERTO ARAYA OVIEDO

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

2020

## **Agradecimientos**

Al Centro de Investigaciones en Contaminación Ambiental (CICA) por el apoyo brindado para realizar el primer muestreo y los análisis químicos de aguas respectivos en el marco proyecto “Caracterización hidrogeoquímica y determinación del origen del As en aguas de consumo humano en sitios seleccionados de Costa Rica”, # 802-B3-515: de la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica.

A la Msc. Viviana Ramos directora de la UEN de Gestión Ambiental del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AYA) por la colaboración para realizar el trabajo de campo, por el apoyo financiero y logístico para realizar las giras para el cartografiado geológico, las pruebas geofísicas.

Al Laboratorio Nacional de Aguas del AyA, especialmente al Dr. Darner Mora y la Licda. Azucena Urbina, por la realización de los análisis químicos del segundo muestreo de aguas realizado. En el marco del Convenio específico de Cooperación Técnica entre la Universidad de Costa Rica y el AyA.

A las ASADAS (Pavón, La Virgen, San Antonio, Gallito, Cobano, Vasconia, San José, San Antonio, Las Nubes) de la zona por el acceso a los pozos muestreados y el apoyo brindado durante las visitas.

A la Escuela Centroamericana de Geología (ECG) por el soporte para el trabajo de campo y la confección de secciones delgadas para los análisis de petrográfico.

A el Sistema Nacional de Agua subterránea, Riego y Avenamiento (SENARA) que facilitó la información de los registros de pozos presentes en la zona de estudio.

Se agradece a los miembros del comité, la Msc. Ingrid Vargas, la PhD Eloisa Mariani Domínguez y la Msc. Viviana Ramos, por las observaciones brindadas y apoyo en el documento de tesis.

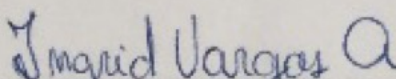
"Esta tesis fue aceptada por la Comisión del Programa de Estudios de Postgrado en Geología de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar al grado y título de Maestría Académica en Hidrogeología y Manejo de Recursos Hídricos"

MARCO  
BARAHONA  
PALOMO (FIRMA)

Firmado digitalmente por  
MARCO BARAHONA  
PALOMO (FIRMA)  
Fecha: 2020.05.17 17:17:22  
+06'00'

---

Dr. Marco Barahona Palomo  
**Representante del Decano**  
**Sistema de Estudios de Posgrado**



---

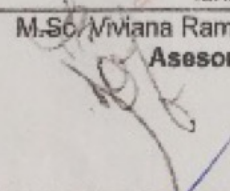
M.Sc. Ingrid Vargas Azofeifa  
**Director de Tesis**

VIVIANA RAMOS  
SANCHEZ (FIRMA)

Firmado digitalmente por  
VIVIANA RAMOS  
SANCHEZ (FIRMA)  
Fecha: 2020.06.15  
10:14:13 -06'00'

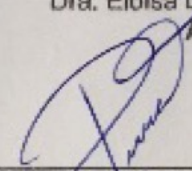
---

M.Sc. Viviana Ramos Sanchez  
**Asesor**



---

Dra. Eloísa Domínguez Mariani  
**Asesor**



---

Dra. Pilar Madrigal Quesada  
**Representante del Director Programa de**  
**Posgrado en Geología**

MARCOS  
ALBERTO ARAYA  
OVIEDO (FIRMA)

Firmado digitalmente por  
MARCOS ALBERTO ARAYA  
OVIEDO (FIRMA)  
Fecha: 2020.05.06 13:59:47  
-06'00'

---

Marcos Alberto Araya Oviedo  
**Sustentante**

## Tabla de contenido

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Justificación.....	1
1.2 Ubicación geográfica .....	2
1.3 Objetivo General .....	3
1.4 Objetivos específicos.....	3
1.5 Alcances y limitaciones del estudio .....	4
1.6 Metas .....	5
1.7 Hipótesis.....	5
1.8 Metodología .....	5
1.8.1 Métodos y técnicas.....	6
1.8.2 Espectroscopia de fluorescencia de rayos X dispersiva en energía (XRF) .....	8
1.8.3 Análisis por difracción de rayos X de minerales varios.....	8
1.8.4 Cromatografía de líquidos .....	10
1.8.5 Colorimetría .....	10
1.8.6 Sondeos eléctricos verticales (SEV) .....	10
1.8.7 Petrografía de rocas .....	11
1.8.8 Mediciones “in situ” de parámetros del agua .....	11
1.8.9 Cartografiado Geológico .....	11
1.9 Instrumentos .....	11
1.9.1 pH-metro .....	12
1.9.2 Equipo de fluorescencia de rayos X (XRF) .....	12
1.9.3 Medidor multi-parámetros.....	12
1.9.4 Cromatógrafo.....	12
1.9.5 Espectrómetro .....	12
1.9.6 Resistivímetro .....	13
1.9.7 Microscopio petrográfico.....	13
<b>Fases de investigación.....</b>	<b>15</b>
1.8.1 Investigación bibliográfica y desarrollo del anteproyecto .....	15
1.8.2 Reconocimiento de la zona.....	15
1.8.3 Campaña de muestreo .....	15
1.8.4 Aplicación de instrumentos .....	15
1.8.5 Análisis de datos .....	16
1.8.6 Desarrollo de resultados e interpretación .....	16

1.8.7 Documento de tesis .....	16
<b>1.10 Antecedentes .....</b>	<b>17</b>
<b>1.11 Problema.....</b>	<b>22</b>
<b>1.12 Ubicación geográfica .....</b>	<b>25</b>
<b>1.13 Vías de acceso.....</b>	<b>26</b>
<b>1.14 Clima .....</b>	<b>27</b>
<b>1.15 Uso de suelo .....</b>	<b>28</b>

## **CAPÍTULO 2: CONTEXTO GEOLÓGICO, GEOMORFOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO..... 30**

<b>2.1 Marco Tectónico Regional.....</b>	<b>30</b>
2.1.1 Fosa Mesoamericana .....	30
2.1.2 Escarpe de Hess .....	31
2.1.3 Graben de Nicaragua .....	31
2.1.4 Arco de Sarapiquí .....	32
2.1.5 Cuenca de San Carlos .....	34
<b>2.2 Geología Regional.....</b>	<b>35</b>
2.2.1 Complejo del Aguacate .....	38
2.2.2 Formación Venado .....	38
2.2.3 Formación Buenavista .....	40
2.2.4 Cuaternario .....	41

## **3 CAPÍTULO 3: MARCO TEÓRICO..... 42**

<b>3.1 Introducción: Compuestos inorgánicos naturales en el agua subterránea.....</b>	<b>42</b>
<b>3.2 Aspectos fisicoquímicos del arsénico .....</b>	<b>46</b>
<b>3.3 Fuente, liberación y movilización del arsénico .....</b>	<b>47</b>

## **CAPÍTULO 4: RESULTADOS ..... 51**

<b>4.1 Geomorfología Local .....</b>	<b>51</b>
4.1.1 Terrazas fluvio-lacustres.....	54
4.1.2 Cascadas y ríos encajados .....	54
4.1.3 Lineamientos y falla inferida.....	54
<b>4.2 Geología Local.....</b>	<b>55</b>

4.2.1	Unidad de Brechas y tobas .....	60
4.2.2	Unidad Tobas polimícticas (Lahares) .....	63
4.2.3	Unidad de tobas arcillosas (Lahares). ....	64
<b>4.3</b>	<b>Geoquímica .....</b>	<b>66</b>
4.3.1	Muestra P19 .....	69
4.3.2	Muestra P20 .....	70
4.3.3	Muestra P21 .....	70
4.3.4	Muestra P28 .....	71
4.3.5	Muestra P31 .....	71
4.3.6	Relación de componentes elementales.....	71
<b>4.3</b>	<b>Exploración geofísica.....</b>	<b>77</b>
<b>4.4</b>	<b>Hidrogeología .....</b>	<b>83</b>
<b>4.5</b>	<b>Hidrogeoquímica .....</b>	<b>90</b>
4.5.1	Parámetros de campo .....	96
4.5.1.1	Alcalinidad .....	96
4.5.1.2	Conductividad Eléctrica .....	98
4.5.1.3	pH .....	101
4.5.1.4	Oxígeno disuelto.....	103
4.5.1.5	Temperatura .....	106
4.5.1.6	Eh.....	108
4.5.2	Iones mayores .....	109
4.5.3	Otros elementos.....	112
4.5.3.1	Concentración de Fe en el agua subterránea .....	112
4.5.3.2	Concentración de Mn en el agua subterránea .....	113
4.5.3.3	Concentración de As en el agua subterránea .....	115
4.5.4	Análisis de concentraciones de Mn, Fe y As .....	118
4.5.5	Análisis de concentraciones en perfiles .....	132
4.5.5.1	PERFIL 1 .....	134
4.5.5.2	PERFIL 2 .....	139
<b>CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN.....</b>		<b>143</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>		<b>149</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>154</b>

## Resumen

Algunos sectores del país exhiben altas concentraciones de arsénico, hierro y manganeso de origen natural en el agua subterránea, lo cual genera un impacto social importante. Este estudio se enfoca en esta problemática en los distritos de El Amparo, Los Chiles y San Jorge, en el cantón de los Chiles, provincia de Alajuela, abarcando un área de 223 km<sup>2</sup>.

El objetivo de la investigación es identificar las características hidrogeoquímicas mediante muestreo y análisis de agua, roca y sedimentos, para entender los procesos de movilización del manganeso, hierro y arsénico en el agua subterránea de la zona de estudio.

En la zona se definen dos unidades geomorfológicas, la cuales son: llanura aluvial y laderas denudacionales de pendiente baja. Geológicamente se definen tres unidades: la formación Venado que consiste de una secuencia de tobas y brechas; la formación Buena Vista, que consiste de lahares; y por último los depósitos aluviales y coluviales del cuaternario.

Con los análisis geoquímicos se define una zona donde todos los componentes elementales de la roca presentan comportamientos anómalos. Esto se asocia a una falla inferida que es registrada mediante sondeos eléctricos verticales, y evidencia que los componentes tectónicos de la zona son el origen de la movilización de las especies en análisis.

Hidrogeológicamente se define una sola unidad hidrogeológica, que abarca las brechas y tobas de la formación Venado y parte de los lahares de la formación Buena Vista. El flujo del agua subterránea es en dirección norte con un gradiente hidráulico  $2,57 \times 10^{-3}$  a  $9,09 \times 10^{-3}$ .

Se logra definir una influencia climática en las concentraciones de arsénico, siendo mayores en época seca en comparación con la época lluviosa. Además, se define que las concentraciones de iones, especies elementales y parámetros medidos en campo presentan variaciones con el flujo, tendiendo a cambiar conforme el flujo avanza al sur y el tiempo de tránsito es superior, esto evidencia que el contacto con la roca es la principal fuente de las especies químicas en el agua subterránea.

## Lista de cuadros

Cuadro 1. Técnicas e instrumentos asociados, utilizados en el presente estudio. ....	13
Cuadro 2. Parámetros, iones e isótopos importantes en los análisis químicos.....	13
Cuadro 3 Datos de las estaciones meteorológicas .....	27
Cuadro 4. Datos generales de los sondeos eléctricos verticales.....	78
Cuadro 5. Información de perfiles geoelectricos, sondeos que los conforman y longitud. 79	
Cuadro 6. Información del número de pozo con la respectiva localidad. ....	93
Cuadro 7. Series de análisis según el pozo de procedencia. ....	118
Cuadro 8. Identificación de los pozos y localidades según perfil. ....	132



## Lista de figuras

Figura 1. Ubicación General del cantón de Los Chiles, en la provincia de Alajuela.....	3
Figura 2. Diagrama de la metodología empleada.....	17
Figura 3. Sector de estudio en el cantón de Los Chiles y los distritos que abarca. ....	25
Figura 4. Área de estudio (223 km <sup>2</sup> ) delimitada por el río Pocosol y el río Hernández, y la red de pozos disponibles para el muestreo. ....	26
Figura 5. Gráfico de la precipitación media mensual y de las temperaturas medias mensuales, según los datos de las estaciones meteorológicas de Los Chiles y Upala (IMN, 2016).....	28
Figura 6 Mapa de órdenes de suelos en el área de estudio (Tomado de CIA, 2016) .....	29
Figura 7. Rasgos tectónico regionales (Tomado de Frischbutter, 2002).....	32
Figura 8. Mapa geológico y columna estratigráfica del arco de Sarapiquí (Tomado de Gazel <i>et al.</i> , 2005). ....	33
Figura 9. Columna estratigráfica generalizada para la zona de estudio (Modificada de Obando, 1986 & Pizarro, 1993). ....	36
Figura 10. Mapa geológico del área de estudio con base en la geología regional (Adaptado de Denyer & Alvarado, 2007).....	37
Figura 11. Diagramas Eh-pH para las especies del Fe y del As (Tomado de Fetter, 1999). ....	43
Figura 12. Diagrama Eh-pH de las especies del azufre (Tomado de Fetter, 1999). ....	44
Figura 13. Procesos de adsorción, absorción e intercambio iónico que afectan la movilidad de especies iónicas en el agua subterránea (Modificado de Appelo & Postma, 2005). ....	45
Figura 14. Mapa geomorfológico del área de tesis.....	53
Figura 15. Mapa geológico local del Amparo y alrededores. ....	57
Figura 16. Perfil geológico del margen este del área de estudio, con dirección noroeste. ....	59
Figura 17. Columna estratigráfica adaptada para la zona de estudio.....	60
Figura 18. Afloramiento en la localidad de Juanilama en el distrito de Pocosol, se observa el salto (izquierda) y la muestra de mano de la brecha encontrada en el sitio (derecha) (Coordenadas CRTM-05: 438 769 E, 1178968 N). ....	61

Figura 19. Muestra de las tobas del afloramiento en las cercanías de Lirios, la toba de ceniza gruesa (izquierda) y la toba de ceniza media (derecha). (Coordenadas: 438206 E, 1187829 N).....	62
Figura 20. Depósito de tobas líticas (izquierda) y depósito de tobas con un clasto de andesita 15 cm de diámetro aproximadamente (Derecha) (Coordenadas CRTM-05: 437234 E, 1200769 N).....	64
Figura 21. Afloramiento de la unidad tobas arcillosas (Izquierda) y muestra de mano con textura típica de los afloramientos donde se aprecian machas blancas y grises (textura tigrillo) en el material rojizo (derecha) (Coordenadas CRTM-05: 429428 E, 1205504 N). 65	65
Figura 22. Ubicación espacial de los puntos de muestreo de roca y suelo.....	68
Figura 23. Ubicación de los sondeos eléctricos verticales y perfiles eléctricos en el área de estudio. ....	80
Figura 24. Modelo de correlaciones geológicas según el perfil eléctrico (P1). ....	81
Figura 25. Modelo de correlaciones geológicas según el perfil eléctrico (P2). ....	82
Figura 26. Perfil hidrogeológico del sector noroeste de la zona de estudio, definición de la unidad acuífera, dirección de flujo y niveles freáticos.....	86
Figura 27. Perfil hidrogeológico del sector noreste de la zona de estudio, definición de la unidad acuífera, dirección de flujo y niveles freáticos.....	87
Figura 28. Mapa hidrogeológico y red de flujo subterráneo, del área de estudio.....	89
Figura 29. Mapa de ubicación de los sitios de muestreo.....	91
Figura 30. Distribución de los perfiles y pozos en el área de estudio .....	133
Figura 31 Modelo de liberación y movilidad del As. ....	147

## Lista de gráficos

Gráfico 1.Relación de los componentes elementales en las muestras de roca.....	72
Gráfico 2.Relación espacial de los componentes elementales en las muestras de roca en la línea de perfil 1. ....	73
Gráfico 3.Relación espacial de los componentes elementales en las muestras de roca en la línea de perfil 1. ....	74
Gráfico 4. Relación espacial de los componentes elementales en las muestras de roca en la línea de perfil 1. ....	74
Gráfico 5.Relación espacial de los componentes elementales en las muestras de suelo en la línea de perfil 1. ....	75
Gráfico 6. Relación espacial de los componentes elementales en las muestras de suelo en la línea de perfil 2. ....	76
Gráfico 7.Relaciones espaciales de los componentes elementales en las muestras de suelo y su interrelación entre el perfil 1 y el perfil 2. ....	77
Gráfico 8. Alcalinidad en el sector noreste del área de estudio.....	97
Gráfico 9. Alcalinidad en el sector noroeste del área de estudio.....	98
Gráfico 10. Conductividad eléctrica (C.E) en el sector noreste del área de estudio. ....	99
Gráfico 11. Conductividad eléctrica (C.E) en el sector noroeste del área de estudio. ....	99
Gráfico 12. Conductividad eléctrica (C.E) unidades (uS/cm) en el área de estudio en la época seca. ....	100
Gráfico 13. Conductividad eléctrica (C.E) (uS/cm) en el área de estudio en la época lluviosa. ....	101
Gráfico 14. Valores de pH en el sector noreste del área de estudio.....	102
Gráfico 15. Valores de pH en el sector noroeste del área de estudio. ....	103
Gráfico 16. Oxígeno disuelto en el sector noreste del área de estudio. ....	104
Gráfico 17. Oxígeno disuelto en el sector noroeste del área de estudio.....	104
Gráfico 18. Oxígeno disuelto (ppm) en área de estudio en época seca. ....	105
Gráfico 19. Oxígeno disuelto (ppm) en área de estudio en época lluviosa.....	106

Gráfico 20. Variaciones de temperatura en el sector noroeste del área de estudio.....	106
Gráfico 21. Variaciones de temperatura en el sector noroeste del área de estudio.....	107
Gráfico 22. Variaciones de Eh en el sector noroeste del área de estudio. ....	108
Gráfico 23. Variaciones de Eh en el sector noroeste del área de estudio. ....	108
Gráfico 24. Diagrama de Piper del muestreo realizado en época seca. ....	110
Gráfico 25. Diagrama de Piper del muestreo realizado en época lluviosa. ....	111
Gráfico 26. Concentraciones de hierro (Fe) en los pozos muestreados en la zona del Amparo.....	112
Gráfico 27. Concentraciones de hierro (Fe).....	113
Gráfico 28. Concentraciones de manganeso (Mn) en los pozos muestreados en la zona del Amparo. ....	114
Gráfico 29. Concentraciones de manganeso (Mn). ....	115
Gráfico 30. Concentraciones de arsénico total en los pozos muestreados en la zona del Amparo en la época seca y lluviosa.....	116
Gráfico 31. Concentraciones de arsénico total en los pozos muestreados en la zona del Amparo en la época seca y lluviosa.....	116
Gráfico 32. Concentraciones de arsenito y arsenato en los pozos muestreados en la zona del Amparo en época seca. ....	117
Gráfico 33. Concentración de Mn total vs concentración de As total. ....	119
Gráfico 34. Relación de la serie 1 según las concentraciones de Fe vs las concentraciones de As. ....	120
Gráfico 35. Relación de la serie 2 según las concentraciones de Fe vs las concentraciones de As. ....	121
Gráfico 36. Relación de la serie 3 según las concentraciones de Fe vs las concentraciones de As. ....	121
Gráfico 37. Relación de C.E vs Especies de As.....	122
Gráfico 38. Relación de C.E vs arsenito.....	123
Gráfico 39. Relación de C.E vs arsenato. ....	123
Gráfico 40. Relación de C.E vs As total.....	124

Gráfico 41. Relación de pH vs As total. ....	125
Gráfico 42. Relación de O.D vs Especies de As. ....	126
Gráfico 43. Relación de Cl/HCO <sub>3</sub> vs As Total. ....	126
Gráfico 44. Relación de Cl/HCO <sub>3</sub> vs. Especies de As. ....	127
Gráfico 45. Relación de Ca+Mg/K+Na vs Arsenito. ....	128
Gráfico 46. Relación de Ca+Mg/K+Na vs Arsenato.....	128
Gráfico 47. Relación SiO <sub>2</sub> vs As. ....	129
Gráfico 48. Relación SiO <sub>2</sub> vs K+Na. ....	130
Gráfico 49. Relación SiO <sub>2</sub> vs Ca+Mg. ....	131
Gráfico 50. Relación Fe total vs O.D. ....	131
Gráfico 51. Perfil de las variaciones de arsénico a lo largo del flujo. ....	134
Gráfico 52. Perfil de las variaciones de hierro a lo largo del flujo. ....	135
Gráfico 53. Perfil de las variaciones de manganeso a lo largo del flujo. ....	135
Gráfico 54. Perfil de las variaciones de arsénico y aluminio a lo largo del flujo. ....	136
Gráfico 55. Perfil de las variaciones de sílice a lo largo del flujo. ....	137
Gráfico 56. Perfil de las variaciones de oxígeno disuelto y carbono orgánico a lo largo del flujo. ....	138
Gráfico 57. Perfil de las variaciones de arsénico a lo largo del flujo. ....	139
Gráfico 58. Perfil de las variaciones de hierro y manganeso a lo largo del flujo.....	140
Gráfico 59. Perfil de las variaciones de arsénico y aluminio a lo largo del flujo. ....	140
Gráfico 60. Perfil de las variaciones de sílice a lo largo del flujo. ....	141
Gráfico 61. Perfil de las variaciones de carbono orgánico a lo largo del flujo. ....	142
Gráfico 62. Perfil de las variaciones de oxígeno disuelto a lo largo del flujo. ....	142

## **Lista de abreviaciones**

As: Arsénico

ASADA: Asociaciones administradoras de sistemas de acueductos y alcantarillados comunales de Costa Rica.

ASTM: American Society of Testing Materials

AyA: Instituto de Acueductos y Alcantarillados

C.E.: Conductividad eléctrica

CICA: Centro de Investigaciones en Contaminación Ambiental

CRTM-05: Transversal de Mercator Costa Rica

ECG: Escuela Centroamericana de Geología

Eh: Potencial de reducción

Fe. Hierro

IGNCR: Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica

IMN: Instituto Meteorológico Nacional

k: Conductividad hidráulica

LNA: Laboratorio Nacional de Aguas

MINAE: Ministerio de Ambiente y Energía

Mn: Manganeseo

N.D.: Nivel dinámico de agua subterránea

N.E.: Nivel estático de agua subterránea

O.D.: Oxígeno disuelto

pH: Potencial de hidrógeno

Prof.: Profundidad

Redox: Oxidación-Reducción

RCAP: Reglamento para la calidad de agua potable

RECOPE: Refinadora Costarricense de Petróleo

SENARA: Servicio Nacional de Agua subterránea, Riego y Avenamiento

SEV: Sondeos Electricos Verticales

T: Transmisividad

TOC: Carbono orgánico total

UCR: Universidad de Costa Rica

XRF: Fluorescencia de rayos X



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA

SEP Sistema de  
Estudios de Posgrado

**Autorización para digitalización y comunicación pública de Trabajos Finales de Graduación del Sistema de Estudios de Posgrado en el Repositorio Institucional de la Universidad de Costa Rica.**

Yo, Marcos Alberto Araya Oviedo, con cédula de identidad 4-0205-0507, en mi condición de autor del TFG titulado \_\_\_\_\_

Movilidad Del Manganese, Hierro Y Arsénico En El Agua Subterránea Del Distrito Del Amparo Y Alrededores, Los Chiles, Alajuela, Costa Rica.

Autorizo a la Universidad de Costa Rica para digitalizar y hacer divulgación pública de forma gratuita de dicho TFG a través del Repositorio Institucional u otro medio electrónico, para ser puesto a disposición del público según lo que establezca el Sistema de Estudios de Posgrado. SI ☒ NO \* ☐

\*En caso de la negativa favor indicar el tiempo de restricción: \_\_\_\_\_ año (s).

Este Trabajo Final de Graduación será publicado en formato PDF, o en el formato que en el momento se establezca, de tal forma que el acceso al mismo sea libre, con el fin de permitir la consulta e impresión, pero no su modificación.

Manifiesto que mi Trabajo Final de Graduación fue debidamente subido al sistema digital Kerwá y su contenido corresponde al documento original que sirvió para la obtención de mi título, y que su información no infringe ni violenta ningún derecho a terceros. El TFG además cuenta con el visto bueno de mi Director (a) de Tesis o Tutor (a) y cumplió con lo establecido en la revisión del Formato por parte del Sistema de Estudios de Posgrado.

**INFORMACIÓN DEL ESTUDIANTE:**

Nombre Completo: Marcos Alberto Araya Oviedo.

Número de Carné: A80494 Número de cédula: 4-0205-0507.

Correo Electrónico: marayov28@gmail.com.

Fecha: 27-3-2020 . Número de teléfono: 8355-9048.

Nombre del Director (a) de Tesis o Tutor (a): Ingrid Vargas Azofeifa.

**FIRMA ESTUDIANTE**

Nota: El presente documento constituye una declaración jurada, cuyos alcances aseguran a la Universidad, que su contenido sea tomado como cierto. Su importancia radica en que permite abreviar procedimientos administrativos, y al mismo tiempo genera una responsabilidad legal para que quien declare contrario a la verdad de lo que manifiesta, puede como consecuencia, enfrentar un proceso penal por delito de perjurio, tipificado en el artículo 318 de nuestro Código Penal. Lo anterior implica que el estudiante se vea forzado a realizar su mayor esfuerzo para que no sólo incluya información veraz en la Licencia de Publicación, sino que también realice diligentemente la gestión de subir el documento correcto en la plataforma digital Kerwá.

## Capítulo 1: Introducción

### 1.1 Justificación

Algunos sectores del país, como el sector de la zona de Aguas Zarcas en la provincia de Alajuela (Mollinedo, 2014) y el de Bagaces y Cañas en la provincia de Guanacaste (Mora, 2011), exhiben altas concentraciones de arsénico (As) natural en el agua subterránea. El Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) ha atendido la situación bajando la concentración del arsénico en el agua de abastecimiento público con plantas de absorción en distintas localidades afectadas; como Los Chiles, Bagaces y Cañas (Mora, 2011).

El impacto social del agua con As es un factor importante debido a que se han presentado casos en Cartago (Montero *et al.*, 2010), Bagaces, Aguas Zarcas, Cañas, Los Chiles (Mora, 2011) y en los alrededores de los volcanes Rincón de la Vieja y Miravalles (Hammurlund & Piñones, 2009), aunque estos últimos no se refieren a aguas de consumo humano (Ver figura 1), en estas localidades el arsénico es de origen natural y es una situación poco estudiada a nivel nacional, por lo que es necesario determinar cuál es la fuente natural del elemento tóxico y otros metales que también se encuentran asociados como el manganeso (Mn) y hierro (Fe); también se debe determinar la movilidad de estos elementos dentro del acuífero, para buscar alternativas para su tratamiento y comprender mejor la situación actual del recurso hídrico en estas zonas.

La presencia del Mn, Fe y As al igual que otros elementos, está relacionada con las condiciones de oxidación reducción (redox) del agua subterránea; además, el agua es un recurso vital al cual todos tienen derecho, por lo que se debe concretar e investigar las causas de estas concentraciones anómalas en el agua, para la toma de decisiones por parte de las entidades respectivas y aplicar metodologías cada vez más eficientes y viables para brindar agua potable a la población. Los aspectos indicados anteriormente hacen de esta investigación una pieza clave y de relevancia para la toma de decisiones, ya que antes de aplicar medidas de tratamiento del agua con fines de abastecimiento y otros usos, deben realizarse estudios geoquímicos del agua subterránea para comprender y avanzar en la solución de la problemática del Mn, Fe y As.



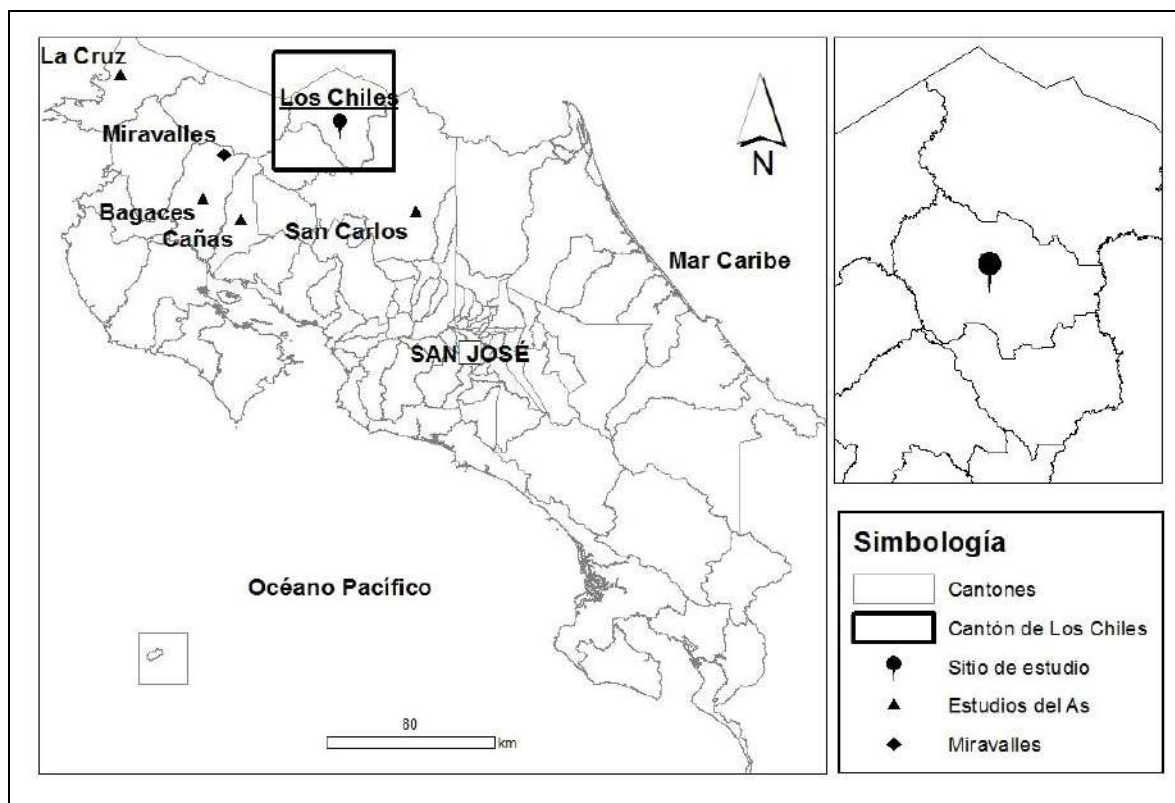
En el contexto académico, esta investigación aporta bases a partir de las cuales pueden realizarse otras investigaciones sobre concentraciones anómalas de arsénico natural o movilidad de especies tóxicas naturales en acuíferos, tanto en el país como a nivel internacional donde también se ha ligado el As a ambientes volcánicos donde las fuentes termales, vidrio volcánico y alteración hidrotermal son elementos comunes (López *et al.* , 2012). En la zona de Los Chiles, Cañas y Bagaces los principales acuíferos conocidos están compuestos por rocas volcánicas según Arias *et al.* (2006), se trata de rocas volcánicas del Neógeno, esta condición favorece la presencia del metaloide (As) y otros metales en disolución (Mn y Fe).

Debido a estas razones, el país presenta condiciones naturales que propician la presencia del As geogénico, es importante conocer las bases de la movilización y procesos de liberación de especies en disolución de las rocas hacia el agua subterránea; además conocer las otras especies disueltas, como el Mn y el Fe, ya que afectan directamente la movilidad del As.

El valor teórico de este estudio, se fundamenta en la escasez de estudios en el área de hidrogeoquímica aplicada a las aguas con As a nivel nacional; por lo que se aportará información relevante sobre el tema. Además, es un tema amplio y apreciable donde otros profesionales se pueden incorporar para incluir distintos enfoques sobre esta problemática. Esta investigación se realizó con el apoyo del AyA, el Centro de Investigaciones en Contaminación Ambiental (CICA) y la Escuela Centroamericana de Geología (ECG), mediante el convenio de Cooperación entre la Universidad de Costa Rica (UCR) y el AyA. En el marco del proyecto "Caracterización hidrogeoquímica y determinación del origen del arsénico en aguas de consumo en sitios seleccionados en Costa Rica" (N° 802-B3-515), coordinado por el CICA.

## 1.2 Ubicación geográfica

La zona de estudio (figura 1) abarca parte de los distritos: El Amparo, Los Chiles y San Jorge, en el cantón de Los Chiles, provincia de Alajuela. El área total de la zona de estudio es de 223 km<sup>2</sup> aproximadamente, entre las coordenadas 425000-445000 E y 1190000-1210000 N (CRTM-05).



**Figura 1.** Ubicación General del cantón de Los Chiles, en la provincia de Alajuela.

En la figura 1 además se representa espacialmente los estudios realizados sobre el arsénico en el agua en distintas localidades del país.

### 1.3 Objetivo General

Identificar las características hidrogeoquímicas en el distrito Amparo, Los Chiles, Alajuela, mediante muestreo y análisis de aguas, rocas y suelos, para entender los procesos de movilización temporal y espacial del manganeso, hierro y arsénico en el agua subterránea.

### 1.4 Objetivos específicos

- 1.4.1 Caracterizar el ambiente geoquímico del área de estudio realizando muestreos de rocas y suelos en la zona de estudio, para determinar la fuente del manganeso, hierro y arsénico.

- 1.4.2 Analizar las propiedades fisicoquímicas de agua mediante análisis de campo y laboratorio, para plantear un modelo de movilización y establecer las interacciones químicas más importantes que se dan entre el manganeso, hierro y arsénico en el acuífero.

## 1.5 Alcances y limitaciones del estudio

- 1.5.1 El estudio es de carácter exploratorio, de un tema y una zona poco estudiada y donde la información disponible es limitada.
- 1.5.2 La definición de unidades geológicas y ejecución del mapa geológico se elaboró con información de pozos y afloramientos, los afloramientos son escasos en la zona por lo que la interpolación litológica se realizó con pocos datos. La geomorfología se basó en el análisis de modelos de sombras realizados con las curvas 1:50 000 (IGNCR), que otorga detalle medio.
- 1.5.3 El muestreo de aguas subterráneas se realizó en pozos de abastecimiento pertenecientes a acueductos rurales y no así en pozos de monitoreo; en los pozos de abastecimiento el caudal es alto y la rejilla por lo general es extensa, no es localizada y podría no captar una sola unidad hidrogeológica. Sin embargo, las muestras de agua son representativas de la composición promedio del agua subterránea de la zona.
- 1.5.4 Los ensayos de laboratorio realizados a las muestras variaron debido a cambio de laboratorio encargado del análisis, pasado del CICA al LNA, por lo tanto, el muestreo de época seca se analizó de forma completa y tal como fue solicitado para obtener información de todos los datos pertinentes para el análisis. Sin embargo, el segundo muestreo o muestreo de época lluviosa, fue analizado de una forma general, faltando información de la mayoría de parámetros que se analizaron inicialmente. Por esta razón no se puede concluir de igual forma sobre los datos de la época lluviosa.

## 1.6 Metas

- 1.6.1 Realizar un muestreo de suelos y rocas a inicios del 2016.
- 1.6.2 Elaborar un mapa geológico de superficie del área de estudio y realizar un modelo hidrogeológico conceptual a partir de la información de pozos, para definir el o los acuíferos de la zona y la dirección de flujo.
- 1.6.3 Ejecutar un muestreo de aguas en época seca y otro en época lluviosa del año 2016, abarcando toda la red de pozos escogida para el estudio de la zona.
- 1.6.4 Interpretar y procesar los resultados de las muestras, a mediados y finales del 2016, utilizando programas especializados.
- 1.6.5 Plantear un modelo de movilización del As, Mn y Fe.

## 1.7 Hipótesis

- 1.7.1 Las concentraciones anómalas de manganeso, hierro y arsénico en el agua subterránea de la zona, son producto de las condiciones redox, las formaciones geológicas ricas en vidrio volcánico y la movilización es favorecida por el tectonismo que permite el ascenso de fluidos geotermales profundos.
- 1.7.2 La movilidad del arsénico en la zona está controlada por cambios geoquímicos en el agua, como variaciones en el pH, el Eh (condiciones redox) y concentraciones de especies disueltas (especialmente Mn y Fe).

## 1.8 Metodología

En la figura 2, se presenta un diagrama de flujo de la estructura de la investigación.

El **tipo de estudio** es exploratorio y descriptivo, debido a que se pretende investigar un tema poco estudiado en el país, su objetivo es identificar y explicar una problemática que en este caso es la movilidad y comportamiento del manganeso, hierro y arsénico en el agua subterránea del distrito de El Amparo, Los Chiles, Alajuela.

El **enfoque** es mixto, porque en el estudio se procura recolectar datos cuantitativos y cualitativos, los cuales se integran y discuten conjuntamente, para obtener un resultado más amplio sobre el tema analizado.

El **diseño** del estudio se basa en investigación de campo y laboratorio, debido a que se estudia un fenómeno que se da de manera natural y se busca la situación más real posible, por lo que realiza una investigación ex post facto (no controla variables), esto porque es un fenómeno que ya ocurrió, por lo que no es posible controlar variables.

#### 1.8.1 Métodos y técnicas.

El método de la investigación se fundamentó en la recolección de muestras de roca, suelo y agua en distintos puntos dentro del área de estudio y a lo largo de la red de pozos, y determinaron las concentraciones de manganeso, hierro, arsénico y otros elementos en los distintos materiales, su movilidad y evolución espacial en el acuífero.

Se realizó un mapeo geológico de superficie en la zona a escala 1:105000 y se generó un mapa geológico del área de estudio; también se elaboró un modelo hidrogeológico con la información geológica y piezométrica de los pozos para definir el acuífero superficial de la zona y cuál es la dirección de flujo. Los pozos se seleccionaron previamente, para asegurar que se conocía la ubicación de la rejilla y la litología.

Para el muestreo de rocas, suelos y aguas, se siguió un protocolo en cada recolecta para el control de calidad, donde todas las muestras presentan registro de coordenadas, fecha y hora, descripción del sitio, geología, profundidad a la que fue tomada, uso del suelo y otros. Además, se tomaron muestras representativas y se almacenaron en envases de polietileno o vidrio (ASTM-D4448, 2013); los envases se lavaron con aguas destilada previamente al muestreo. Además, los envases se manipularon con precaución para evitar contaminación por factores externos. Las muestras sólidas también fueron representativas, donde el suelo y sedimento se recolectó de las capas de interés según el propósito, y la roca debe analizarla tanto meteorizada como sana, las muestras se conservaron en frascos de vidrio (sedimentos y suelos), y la roca se protegió con papel y plástico (ASTM-D4448, 2013).

Se midieron parámetros de campo en cada sitio donde se realizó muestreo de aguas (pH, C.E., O.D., alcalinidad, temperatura). Una vez que se estabilizaron los datos durante la medición se recolectaron las muestras en envases separados según el análisis previsto, el cual se describe en la metodología. Para el caso de las muestras del As, se recolectaron dos muestras, una filtrada y una sin filtrar; la muestra filtrada se pasó por filtros que consisten de cartuchos desechables que retienen el arsenato ( $\text{As}^{+5}$ ) y deja pasar el arsenito ( $\text{As}^{+3}$ ), de esta forma la muestra no filtrada contendrá una concentración total de arsénico, compuesta por la suma del arsenito y arsenato; mientras que la muestra filtrada contendrá la concentración de arsénico que corresponde únicamente con el arsenito contenido en la muestra, posteriormente se sustrajo a la concentración total de As la concentración de arsenito y se obtiene la concentración de arsenato.

En el caso de las muestras de agua, los envases se lavaron con agua destilada previa al muestreo y antes de tomar la muestra se enjuagaron 3 veces con el agua del sitio antes de tomar la muestra. Para el análisis de cationes, metales pesados y nitratos se filtró la muestra en el campo, donde el tamaño de la malla del filtro varía de 0,45 a 0,10  $\mu\text{m}$ ; se acidificó la muestra cuando se requiere realizar análisis de cationes, metales pesados y nitratos. La acidificación y el filtrado se realizaron para evitar la precipitación de complejos y reacciones de oxidación y adsorción. Las muestras se almacenaron a temperaturas específicas.

Las muestras se transportaron en hieleras con hielo, para conservar el estado original del material recolectado, evitando así el crecimiento de bacterias y pérdidas de volátiles. Los análisis se realizaron en el CICA y LNA para el primer muestreo y únicamente en el LNA para el segundo muestreo.

La técnica que se utilizó para esta investigación, involucró el análisis de datos geológicos e hidrogeológicos, donde se incluyeron resultados fisicoquímicos de las muestras recolectadas, los cuales se lograron mediante instrumentos y análisis en laboratorio y/o en el campo (Ver técnica 1.8.2, 1.8.3 y 1.8.4). Con los análisis fisicoquímicos se conoció la composición química de la roca y del agua (Cuadro 2).

Los suelos y sedimentos se secaron en horno antes de realizar el análisis y después se tamizaron; en el caso de muestras de roca se trituraron y homogenizaron mediante

tamizado, a ambos materiales se les aplicó digestión ácida para generar lixiviados, y estos son los blancos del análisis fisicoquímico, las técnicas se describen en las secciones 1.6.2, 1.6.3, 1.6.4.

Dentro de las técnicas utilizadas se encuentra la cromatografía, espectrometría, difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X y colorimetría.

#### 1.8.2 Espectroscopia de fluorescencia de rayos X dispersiva en energía (XRF)

Es una técnica de carácter no destructivo que permite determinar la concentración absoluta (% , mg/kg, ppm) de los elementos químicos que conforman una determinada matriz. Se basa en la excitación del material al someterlo a emisiones de rayos X de alta energía irradiados por un tubo de rayos X de plata que permite ionizar internamente los elementos que se encuentran en rangos de energía entre 1,5 KeV y 19,6 KeV, y la identificación de los elementos se logra por el registro de las emisiones de rayos X secundarios los cuales son característicos de los elementos que fueron ionizados internamente por la radiación electromagnética. Los rayos X son detectados y contados por un analizador multicanal que discrimina por energía y forma, generando fotopicos independientes cuya energía identifica el elemento y su intensidad es proporcional a la concentración. El límite de detección de 8 mg As/kg, 19 mg Fe/kg y 19 mg Mn/kg. Entre las desventajas se puede incluir la interferencia por el plomo (Pb) y el efecto de la matriz en caso de muestreo de rocas (Litter *et al.*, 2009).

#### 1.8.3 Análisis por difracción de rayos X de minerales varios

Este método permite identificar estructuras cristalinas en minerales y rocas, mediante la interacción de la radiación electromagnética con los átomos de la muestra. Cuando el haz de rayos X bombardea las muestras desde un tubo de cobre con una potencia de 45 kV y 40 mA con un barrido de 5° a 70°, el haz es difractado y refleja los planos de la estructura cristalina. Las ventajas del método incluyen, que la muestra puede ser un sólido cristalino o polvo, además la muestra no necesita preparación y determina las fases mineralógicas, por lo que permite identificar el arsénico adsorbido por óxidos e hidróxidos de Fe. Una de las desventajas es que para muestras líquidas la técnica se complica y la

precisión no es buena. Por otro lado, el límite de detección es de más de 3-5% de concentración de la fase (Litter *et al.* , 2009).



#### 1.8.4 Cromatografía de líquidos

Método físico de separación para la caracterización de mezclas complejas, se basa en el principio de la retención selectiva, la cual divide los componentes y permite identificar y determinar las cantidades de dichos componentes. El resultado es un cromatograma, el cual es un gráfico constituido de picos que corresponden con los componentes de la mezcla separada. La ventaja sobre la cromatografía gaseosa, se basa en la capacidad de separar compuestos no volátiles y también aquellos que se descomponen a elevadas temperaturas, además es muy versátil ya que tanto la fase estacionaria como la móvil pueden modificarse. Entre las principales desventajas se encuentra el efecto de la temperatura, el control sobre el caudal de la fase móvil, el control del pH (Litter *et al.* , 2009).

#### 1.8.5 Colorimetría

Este método se basa en el principio de la absorbancia de una sustancia, que refleja la concentración de las mismas, mostrando mayor concentración las sustancias con lecturas superiores de absorbancia. Esta técnica que permite conocer la concentración soluto obteniendo valores de concentración aproximados para elementos o compuestos químicos específicos. Dependiendo del colorímetro utilizado muchas veces las medidas dependen del ojo humano lo cual puede modificar los resultados. Para determinar alcalinidad mediante este método, se recomienda utilizar una base en lugar de un ácido.

#### 1.8.6 Sondeos eléctricos verticales (SEV)

Es un método geofísico empleado en la prospección geológica y de aguas subterráneas, según la norma ASTM D6431-99; que corresponde con un arreglo cuadripolar tipo Schlumberger, en el cual se usan 4 electrodos co-lineales en superficie donde los electrodos externos están conectados a una fuente de poder (electrodos de corriente) y los electrodos internos son electrodos de potencial. Con este método se inyecta corriente eléctrica por los electrodos de corriente y se registran valores de resistividad en los electrodos de potencial, que reflejan condiciones físicas de las rocas y se asocian con cambios litológicos y la presencia de agua subterránea.

Durante el año se realizó exploración geofísica por parte de INGEOFICA DOSMIL. S.A, mediante contratación del AyA, donde se realizaron 10 sondeos eléctricos verticales, distribuidos en la zona de estudio.

#### 1.8.7 Petrografía de rocas

Es un método que se ocupa de la descripción de las rocas a nivel microscópico, de su contenido mineral y de su textura o estructura, con el objetivo de clasificar la roca. Estos análisis se realizaron en el laboratorio de petrografía de la ECG (UCR).

#### 1.8.8 Mediciones “in situ” de parámetros del agua

Se basa en mediciones en campo de los principales parámetros del agua, para realizar un mejor muestreo acorde a la estabilización de las condiciones fisicoquímicas del agua y un posterior análisis de la composición y calidad de la misma. Entre los parámetros que se miden está la conductividad eléctrica (C.E), alcalinidad, pH, Eh, temperatura, y oxígeno disuelto (O.D). Se realizan estas mediciones para comparar las variaciones con los resultados de laboratorio, ya que puede haber cambios en estos parámetros durante el almacenamiento y procesamiento de la muestra.

#### 1.8.9 Cartografiado Geológico

Este método se basa en el trazado de unidades geológicas en el mapa topográfico, a partir del levantamiento de secciones a lo largo del área de estudio e interpolación de puntos. El objetivo es que el mapa generado contenga todas las observaciones geológicas y sus interpretaciones bien representadas, de manera coherente y fácil de entender. El mapa será una herramienta importante para resolver los problemas geológicos del área en estudio.

### 1.9 Instrumentos

Los instrumentos más importantes que se utilizan en los análisis mencionados anteriormente son los siguientes:

### 1.9.1 pH-metro

Es un sensor para medir el pH de una disolución, el cual mide el potencial que se desarrolla a través de una membrana de vidrio que separa dos soluciones con distinta concentración de protones. El instrumento consiste de un par de electrodos uno de calomel (cloruro de mercurio) y otro de vidrio, los cuales se sumergen en la solución.

### 1.9.2 Equipo de fluorescencia de rayos X (XRF)

Es un equipo que excita el material al someterlo a emisiones de rayos x de alta energía, y registra las emisiones de rayos X secundarios los cuales con característicos del material.

### 1.9.3 Medidor multi-parámetros

Es un instrumento que mediante sondas inteligentes mide parámetros de la composición química del agua y propiedades físicas, como conductividad eléctrica, pH, Eh, oxígeno disuelto, temperatura, entre otros. Presenta varios sensores y cada uno mide uno de los parámetros mencionados anteriormente, y presenta los valores numéricos en la pantalla del equipo.

### 1.9.4 Cromatógrafo

Instrumento de separación física de mezclas complejas, donde se separan los distintos componentes de una solución, permitiendo identificar y determinar cantidades de estos componentes.

### 1.9.5 Espectrómetro

Es un artefacto que permite analizar la composición de diferentes elementos químicos e isotopos atómicos en función de su relación carga-masa.

### 1.9.6 Resistivímetro

Es un instrumento que inyecta electricidad al subsuelo a través de los electrodos de corriente y registra la corriente en los electrodos de potencial, permitiendo determinar las resistividades de los materiales.

### 1.9.7 Microscopio petrográfico

Se basa en lentes ópticos con dos polarizadores que permiten pasar únicamente la luz que vibra en un único plano, este instrumento que permite estudiar la estructura y organización microscópica de la roca, permitiendo determinar composición mineralógica y textural de las rocas.

**Cuadro 1.** Técnicas e instrumentos asociados, utilizados en el presente estudio.

<b>Técnica</b>	<b>Instrumento (s)</b>
Espectroscopia de fluorescencia de rayos X dispersiva en energía	XRF
Análisis por difracción de rayos X de minerales varios	Espectrómetro
Cromatografía de líquidos	Cromatógrafo
Sondeos eléctricos verticales	Resistivímetro
Petrografía de rocas	Microscopio petrográfico
Colorimetría	Test kit de manganeso, hierro, nitratos y nitritos.
Mediciones “in situ” de parámetros del agua	pH-metro, medidor multiparámetros.

**Cuadro 2.** Parámetros, iones e isótopos importantes en los análisis químicos.

<b>Parámetros y elementos químicos indicadores</b>		
<b>Especiación</b>	<b>Asociaciones</b>	
<b>As<sup>+3</sup></b>	Arsenito, más móvil y tóxico, presente en condiciones ácidas oxidantes o reductoras alcalinas.	Sr, V, Mo, Se, Li, Cr, Sb, Zn
<b>As<sup>+5</sup></b>	Arsenato, presente en condiciones	Disolución de vidrio volcánico

oxidantes a neutras, es móvil pero menos que el arsenito.	
<b>Atenuación</b>	Zr, Sr, Rb, Mn, Ba, SiO <sub>2</sub> , Zn
<b>Fe<sup>+3</sup></b> Formador de oxi-hidroxidos que adsorben al As	<b>Parámetro</b>
<b>Mn<sup>+2</sup></b> Relación inversa con el As, y el Fe 2+; si hay Mn no hay disolución de óxidos de Fe y no se libera el As adsorbido.	<b>Temp</b> Ambientes geotermales de alta temperatura presentan valores altos de As
<b>Al<sup>+3</sup></b> Formador de oxi-hidróxidos que adsorben al As	<b>pH</b> As se encuentra en pH neutros a ligeramente básicos entre 6,5 a 8,5. Determina la oxidación y movilidad del As. pH altos.
<b>Ca<sup>2+</sup></b> Calcio retarda la desorción, debido a su carga.	<b>Eh</b> Valores bajos en Eh se correlacionan con As. Determina la oxidación y movilidad del As.
<b>Movilización</b>	<b>C.E</b> Valores altos en C.E = altos STD.
<b>Fe<sup>+2</sup></b> Valores altos se correlacionan con concentraciones altas de As	<b>O.D</b> Valores bajos de se asocian con ambientes reductores donde la especie dominante es el arsenito.
<b>Cl<sup>-</sup></b> Análogos al As y al tiempo de residencia del agua, producto de la interacción agua-roca. Relación positiva con el As.	<b>SiO<sub>2</sub></b> Valores altos se asocian a concentraciones de As.
<b>Na<sup>+</sup></b>	
<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b> Valores altos de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> se asocian con el As.	
<b>SO<sub>4</sub><sup>-2</sup></b> Análogo al As, debido a los sulfuros que son una de las principales fuentes de As. Controla movilidad y especiación, además acelera la desorción.	<b>F<sup>-</sup></b> Valores altos de ambos aniones se relacionan con valores altos de As. <b>Br<sup>-</sup></b>
<b>PO<sub>4</sub><sup>-3</sup></b> Produce lixiviados que liberan y movilizan el As.	<b>B</b> Análogo a altas concentraciones de As.

## Fases de investigación

### 1.8.1 Investigación bibliográfica y desarrollo del anteproyecto

En esta etapa se consultó fuentes bibliográficas para desarrollar bases en el tema e investigar los antecedentes, además de redacción de objetivos, problema, hipótesis, justificación y todos los aspectos que incluye el anteproyecto (Figura 2).

### 1.8.2 Reconocimiento de la zona

Se visitó la zona por primera vez en enero del 2016, donde se pretende comprobar la información bibliográfica consultada, como geología, geomorfología y rasgos estructurales, ubicación de pozos y todo factor que ayude con la toma de decisiones para la logística de la campaña de muestreo (Figura 2).

### 1.8.3 Campaña de muestreo

En esta fase se realizaron visitas de campo con el objetivo de recolectar 14 muestras de agua, 9 muestras de rocas y sedimentos, en los puntos que se consideraron importantes para el estudio en enero del 2016. La ubicación y frecuencia del muestreo de agua, suelo y roca se determinó mediante el conocimiento previo de la geología e hidrogeología de la zona, mediante un mapeo geológico a detalle en la zona, resultados de sondeos geofísicos y la información de pozos existentes en la zona (Figura 2). Con esta información se realizó un muestreo de probabilidad, al azar en estratificaciones, el cual se realiza al azar en transeptos a lo largo de una línea dentro de zonas con el mismo material de interés (Boulding & Ginn, 2004).

### 1.8.4 Aplicación de instrumentos

En esta segunda fase se realizaron los análisis de laboratorio como el análisis microscópico de la roca y las cromatografías de las muestras de agua, se enviarán las muestras necesarias a laboratorios profesionales donde se analizarán iones de interés y algún otro aspecto químico de interés (Figura 2).

#### 1.8.5 Análisis de datos

En esta fase se analizaron los datos obtenidos tanto en el campo y como en el laboratorio, con los cuales se pretende obtener los resultados de origen y movilidad del As y elementos asociados. Los análisis son cuantitativos y cualitativos debido a que se trabajará con las concentraciones de los componentes químicos pero además con las características y propiedades de los compuestos. De esta manera se quiere aplicar un análisis mixto, donde las propiedades cuantitativas (química) y las propiedades cualitativas (geología) se mezclan para obtener una relación y explicación para el problema en cuestión (Figura 2).

#### 1.8.6 Desarrollo de resultados e interpretación

Por último, con los análisis de datos se generaron los resultados y discusión, con la cual se espera satisfacer los objetivos y cumplir las hipótesis. Además se concluye a partir del análisis y resultados obtenidos (Figura 2).

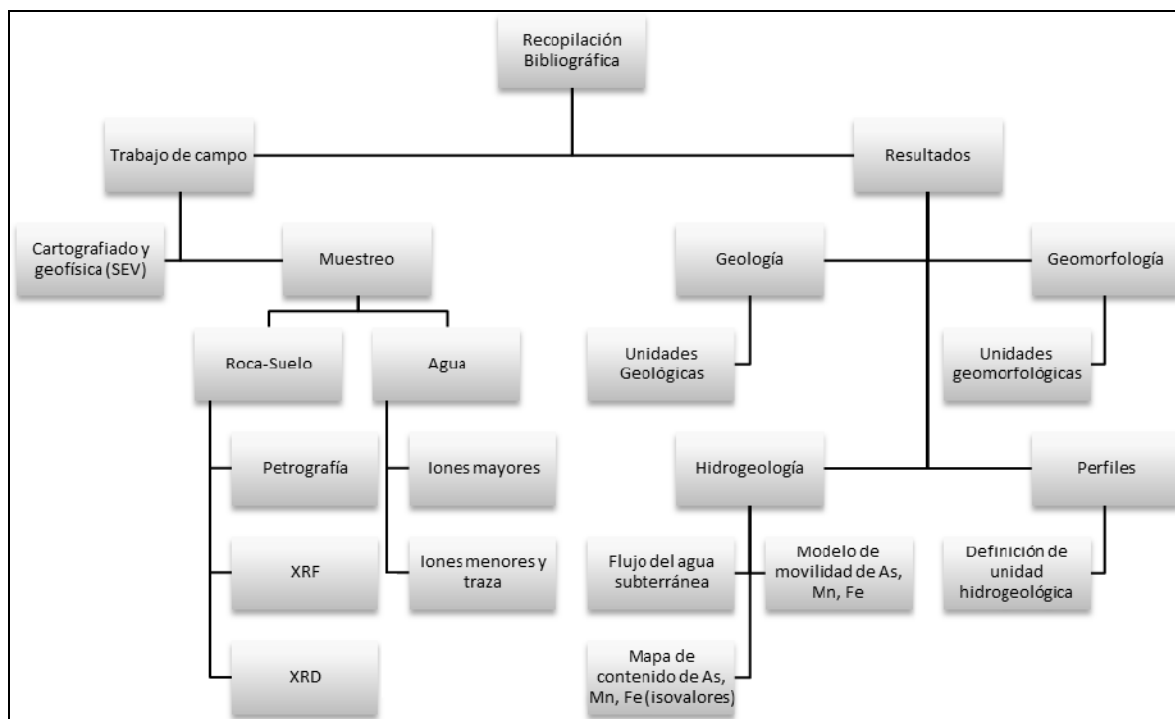
#### 1.8.7 Documento de tesis

En esta última fase se desarrolla el documento escrito de tesis y se organiza de forma coherente toda la información recolectada e interpretada en las fases anteriores.

#### 1.8.8 Análisis de datos

La finalidad de esta etapa es reducir los datos (separación, síntesis y agrupamiento, identificación y clasificación de elementos); disposición y transformación de datos; y obtención y verificación de conclusiones (Figura 2).

Como se mencionó anteriormente el enfoque de la investigación es mixto (cuantitativo y cualitativo), por lo que se va a trabajar con datos numéricos medidos en el campo y propiedades no cuantificables pero que son de gran relevancia en el estudio, esto se debe a que el estudio pretende explicar un fenómeno no observable por lo que es más fácil y genera mejor comprensión del fenómeno.



**Figura 2.**Diagrama de la metodología empleada.

#### 1.10 Antecedentes

### Arsénico en aguas

Los aspectos generales sobre el arsénico de origen natural, son expuestos por Litter & Bundschuh (2010), Litter *et al.* (2009) y Lillo (s.f), donde explican que la ocurrencia, movilidad y especiación del As puede ser producto de la meteorización, actividad biológica, mineralogía y emisiones volcánicas; por lo tanto es muy común que en las zonas volcánicas o vulcano-sedimentarias con sistemas hidrotermales o geotermales, se encuentren concentraciones anómalas de arsénico. Además se explica las condiciones geoquímicas para la movilidad y especiación de dicho metaloide.

El estudio de García *et al.* (En: Bundschuh *et al.* , 2009), se analiza las fuentes del arsénico, se atribuyó a la interacción del agua meteórica con los depósitos volcánicos Terciarios de composición ácida e intermedia, donde los fragmentos de vidrio volcánico, cenizas y micas son las principales fuentes de As. Además el tectonismo se establece como un factor importante en la movilización de As. La movilidad del arsénico en el agua, se vinculó a cambios en el pH, Eh, temperatura, los óxidos de hierro y los cambios en el



sistema. La metodología aplicada en este estudio se basó en mediciones de pH, Eh, conductividad eléctrica y alcalinidad, iones mayores y elementos traza.

Altamirano & Bundschud (En: Bundschuh *et al.* , 2009), estudiaron la fuente de arsénico natural en el valle de Sébaco, Nicaragua. En la zona las concentraciones de As se le atribuye a las rocas volcánicas (Ignimbritas, tobas, andesitas y basaltos) meteorizadas del Terciario y al tectonismo de la zona. Se analizaron los valores de pH, Eh, conductividad eléctrica y alcalinidad, iones mayores y elementos traza; añadiendo mediciones de oxígeno disuelto y temperatura, en muestras de roca, suelo y agua, las cuales se analizaron en el laboratorio con cromatografías iónicas, métodos colorimétricos y espectrómetros. En las muestras de roca, se les aplicó digestión ácida, y el lixiviado fue analizado para obtener las concentraciones de As.

Según Gutiérrez-Ojeda (En: Bundschuh *et al.* , 2009) se determinó la fuente natural del arsénico en la zona de Lagunera, México, y se le atribuye a un cuerpo intrusivo extinto que generó alteración hidrotermal. La metodología aplicada se basa principalmente en muestreo de agua del acuífero, donde se realizaron mediciones de pH, Eh, conductividad eléctrica y alcalinidad, iones mayores y elementos traza .

En Litter *et al.* (2009), se analizan las metodologías para la determinación y especiación de arsénico en aguas y suelos, se explican las concentraciones de arsénico presentes en sólidos y líquidos, y el tratamiento de las muestras en el campo.

Otros de los procesos geoquímicos de la movilidad del arsénico se discuten en Thomas He *et al.*, (2010) donde se estudió un acuífero en Boston, Estados Unidos de América. Se analiza el papel de carbono orgánico en la zona saturada, el cual aumenta la actividad microbiana generando condiciones reductoras en el acuífero, las cuales llevan a un aumento en la concentración de As, Fe y Mn en disolución. La metodología utilizada por los autores se basó en muestreo de suelos y agua, con lo que se obtuvo las concentraciones de O.D, T.O.C, sulfatos, nitratos, nitritos, hierro, especiación de arsénico, y metales (Fe, As, Si, Mn).

En un caso en el campo Mutnovsky (Kamchatka, Russia), Ilgen *et al.* (2011) se enfocan en el arsénico en campos geotérmicos producto del tectonismo; en la zona la

geología está compuesta por tobas, brechas, tobas con pómez e ignimbritas andesíticas a andesito-dacíticas. La metodología se basó en muestreo de aguas, sedimentos y precipitados de fuentes termales, se determinaron índices de saturación, y los otros parámetros analizados por los autores anteriores, utilizando cromatografías, difracción de rayos X y espectrometrías.

Vinson *et al.* (2011), evalúa la fuente y movilización del arsénico mediante trazadores e isótopos de Sr, B, S, O, H, y Ra, en rocas félsicas y sedimentarias volcanoclásticas. Se relacionan elementos traza como Mo, B, Cr, V, Se y Sb como análogos al As. Se utilizó el isótopo de Sr ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) para determinar el origen del sedimento; isótopos de S para determinar la oxidación de sulfuros; incluyendo reducción de  $\text{SO}_4$ . Los isótopos de B se utilizan para determinar el origen de oxianiones y elementos traza. Además, se analizaron isótopos de deuterio y oxígeno-18 para determinar la tasa de recarga del acuífero; por otro lado, la tasa de adsorción se analizó con la relación entre el Ra y el decaimiento del U-238.

López *et al.*, (2012) expuso como los sistemas geotermales y volcánicos son las principales zonas afectadas por concentraciones altas de As en el agua. En Costa Rica se mencionan las zonas de la Caldera de Poco Sol, Miravalles, Rincón de la Vieja, Tenorio y Porvenir-Platanar, como zonas potenciales para la presencia de As. En el campo geotérmico Rincón de la Vieja se encuentran rocas andesíticas y concentraciones de As de 6 a 13 mg/l en el reservorio (Na-Cl). En el campo geotérmico Miravalles el reservorio andesítico tiene concentraciones de 11,9 a 29 mg/l. Además, se menciona que había fuentes termales con valores de 6 mg/l, y altas concentraciones de Na y Cl.

Tabelin *et al.* (2012), realizaron experimentos de laboratorio utilizando rocas con alteración hidrotermal intentando predecir y comprender la movilidad y especiación del arsénico en la zona no saturada. La alteración de la roca resulta en altas concentraciones de As, además pH, Eh, tiempo de residencia y disolución mineral controlan la movilidad del arsénico. La metodología aplicada se basa en experimentos realizados en laboratorio con columnas de la roca y analizando los parámetros que controlan la movilización y especiación del As, los cuales fueron analizados por los autores anteriores.

Según Baba & Sozbilir (2012) se considera como principal fuente los procesos de diagénesis, alteración hidrotermal y tectonismo, en los cuales se dan precipitación de sulfuros ricos en As. Además, los fluidos geotermales ascendentes presentan altas concentraciones de As, las cuales contaminan acuíferos superficiales. También mencionan que la interacción agua-roca y la disolución de tobas riolíticas es una de las principales fuentes de arsénico.

Mukherjee *et al.* (2013) analizaron la influencia del tectonismo, sedimentación y flujo del agua subterránea. Se le atribuyó la contaminación de acuíferos por arsénico al producto de la disolución de minerales primarios y secundarios, además se define que las zonas con depósitos volcánico-génicos y fuentes termales son más propensas, como las zonas de convergencia de placas (subducción), donde se presentan fluidos hidrotermales y vulcanismo.

Kao *et al.* (2013), estudiaron parámetros químicos, composición mineralógica y composición isotópica del sulfuro en el agua subterránea y sedimentos, los cuales se analizaron para determinar la distribución espacial del arsénico. Se estudiaron los ambientes reductores, transicionales y oxidantes dentro del acuífero, y se examinó la forma de movilización y liberación del As, determinando el valor de oxidación del arsénico en cada uno de los ambientes. La metodología se basó en muestreo de agua y suelos para determinar la composición y especiación del As y Fe, secuencia química y composición isotópica.

Hammarlund & Piñones (2009), analizaron la concentración de As en los pozos geotermales, arroyos termales y aguas frías, en los proyectos geotérmicos de los volcanes Miravalles y Rincón de la Vieja, Guanacaste. En estas zonas encontraron concentraciones de hasta 30 mg/l de arsénico. Se analizó la influencia de las aguas geotermales, el efecto del tiempo de residencia y de los óxidos e hidróxidos de Fe, Mn y Al en la especiación y movilidad del As.

En la comunidad de Cañas, Guanacaste se han presentado problemas de agua con arsénico con concentraciones de hasta 136  $\mu\text{g/l}$ , según Mora (2011). En Cañas se cuenta con un campo de pozos con los cuales se abastecieron a 19237 habitantes con concentraciones de 22  $\mu\text{g/l}$  de As en el agua (Mora, 2011). Posteriormente como medidas

de remediación, se diluyó la concentración de As a valores de 11 µg/l. Además, se establece que las concentraciones anómalas de As son de origen volcánico (Mora, 2011).

Del 2012 al 2016 se desarrolló una investigación acerca del arsénico en aguas subterráneas del país, mediante el proyecto "Caracterización hidrogeoquímica y determinación del origen del arsénico en aguas de consumo en sitios seleccionados en Costa Rica" N° 802-B3-515, vía convenio de Cooperación entre la Universidad de Costa Rica por medio del Centro de Investigaciones en Contaminación Ambiental (CICA) y la Escuela Centroamericana de Geología (ECG) y el AyA, además se tuvo colaboración de otras instituciones del estado como el MINAE y el SENARA. Bajo este proyecto se desarrolló un informe sobre el arsénico en la zona de Cañas y Bagaces.

En el informe "Investigación geológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica sobre el origen del arsénico en la zona de Cañas-Bagaces y alrededores" elaborado en conjunto por el AyA, MINAE, SENARA, ECG & CICA (2014), se realiza una descripción a detalle de la geología e hidrogeología de la zona; además se ejecuta un muestreo de agua, suelos y rocas donde se miden los parámetros típicos y elementos traza. Se obtiene que en la zona se encuentran concentraciones de As en el rango de 0,005 a 1,188 mg/L en agua subterránea, siendo siempre los valores altos correlacionales con altas concentraciones de cloruro, altas temperaturas y fallamiento. Por lo tanto, se concluye que el arsénico es de origen natural, debido a la geología, fallas y aguas termales de la zona.

Mollinedo (2014), estudio el origen del arsénico en aguas para consumo humano en la región noroeste de Aguas Zarcas, San Carlos, Alajuela, Costa Rica. En el estudio se realizaron análisis de la geología, hidrogeología y estructuras tectónicas del sitio, además de muestreos de agua, suelos y roca, para determinar las relaciones con el elemento de interés. Dicho estudio concluye que el arsénico encontrado en el agua subterránea varios sitios en Aguas Zarcas tienen un origen natural, asociado a la actividad volcanotectónica de la zona, donde se da un ascenso de fluidos termales hacia la superficie por medio de las estructuras existentes que favorecen su mezcla con aguas meteóricas las cuales descargan en manantiales.

Geología y geomorfología

La estratigrafía de las rocas desde el Mioceno hasta el reciente es expuesta por Obando (1989), donde se identifica la formación Venado (Mioceno medio) la cual es producto de sedimentación marina, compuesta por calizas, lutitas, limolitas, areniscas, conglomerados y brechas. Está sobreyacida por lavas del Complejo del Aguacate, las cuales varían entre andesita y andesita hipo abisal hasta basaltos. Posteriormente se encuentran rocas de la formación Buenavista, compuesta por lahares con alto contenido volcánico con alteración hidrotermal; esta información coincide con De La Cruz (1994)

La geomorfología de la zona de estudio es descrita por Frischbutter (2002) y Bergeoeing & Protti (2006) donde se expone que la geomorfología de Los Chiles es producto orogénesis del cuaternario, de la neotectónica del graben de Nicaragua, y la sedimentación aportada por las cordilleras volcánicas Central y de Guanacaste. Donde se determinan dos unidades geomorfológicas: y los conos de deyección del Pleistoceno medio a superior, compuestos de arcillas rojas ferruginosas y bloques basálticos, andesíticas y tobas; Se extienden hacia el norte alcanzando de 50 a 60 km lineales. La otra unidad son las terrazas fluvio lacustres del Pleistoceno al Holoceno, con direcciones NE-SW las cuales tienen espesores de 10 m y están compuestas por arcillas rojas con manchas blancas y grises.

### 1.11 Problema

Algunos autores presentan las zonas volcánicas como un escenario común para la contaminación de acuíferos con arsénico, donde las concentraciones altas de dicho metaloide se atribuyen a la meteorización de rocas volcánicas o contaminación natural por flujos geotermales ascendentes (Hammurlund & Piñones, 2009; Ilgen *et al.*, 2011; Mukherjee *et al.*, 2013; Baba & Sozbilir, 2012).

Distintas zonas de la provincia de Guanacaste y Alajuela, se ajustan a la situación descrita anteriormente. En el caso de Cañas y Bagaces el arsénico es de origen natural y se relaciona con la geología, la cual está compuesta de tobas e ignimbritas de las formaciones Bagaces, Río Libera y lavas del Grupo Aguacate; fallamiento, y además se encuentran fuentes termales y zonas con potencial geotérmico en los alrededores. En Los Chiles, se encuentra de igual manera, formaciones geológicas constituidas por tobas e ignimbritas, y una geología estructural compleja; Por lo tanto, es una zona propensa a

contaminación por arsénico y otros metales de transición asociados (MINAE, SENARA, AyA, ECG y CICA, 2014).

El Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), determinó que el acueducto de Cañas presentaba concentraciones de arsénico de hasta 25 µg/L e inferiores, e incluso se encontraron pozos con concentraciones máximas de 136 µg/L, por ejemplo, el Pozo 7 Sandillal (Mora, 2011). El agua extraída de estos pozos se utiliza para abastecer una población de 19237 habitantes (Mora, 2011).

La OMS ha establecido en 10 µg/L la concentración máxima admisible (CMA) de arsénico en aguas de consumo humano, sin embargo, las concentraciones en las zonas descritas son anómalas y superan las concentraciones establecidas por el Reglamento para la calidad de agua potable (La Gaceta N°84, 2005). En Los Chiles, se encontraron concentraciones de 17 y 19 µg/L de arsénico, en las localidades de Santa Cecilia y Cristo Rey, respectivamente. Aunque estos valores son inferiores a los reportados en Aguas Zarcas, Cañas y Bagaces, existe interés en determinar el origen de este metaloide en el agua subterránea.

El AyA como respuesta a la contaminación por arsénico, ha instalado plantas para la remoción de As del agua subterránea, en Cañas, Bagaces y Los Chiles. En las localidades de Santa Cecilia y Cristo Rey de Los Chiles también se han encontrado concentraciones de manganeso y hierro asociadas al arsénico; tanto el manganeso como el hierro son metales de transición, muy comúnmente encontrados juntos, ambos metales se encuentran en concentraciones de hasta 500 µg/L por lo que en las plantas de tratamiento también se está tratando el agua para remover las concentraciones de estos dos elementos.

Los efectos en las personas expuestas al consumo de agua con concentraciones de arsénico inorgánico superiores a 10 µg/l incluyen desde síntomas inmediatos como vómito, diarrea, dolor abdominal, entumecimiento y calambres musculares; hasta efectos por exposición a largo plazo en los cuales se observan afecciones cutáneas, cambios en la pigmentación, callosidades en la piel e incluso cáncer. Puede causar tumores malignos en vejiga, vesícula y pulmón (Flanagan *et al.* , 2012). La ingesta de arsénico se relaciona de igual manera con enfermedades cardiovasculares, diabetes y neurotoxicidad

(Flanagan *et al.*, 2012). Estos efectos en la salud se deben a que el arsénico inorgánico es absorbido por las membranas biológicas y se incluyen en el flujo sanguíneo, distribuyéndose por todos los órganos (Castro, 2006). El arsenito es más tóxico que el arsenato, ya que el último afecta menos las actividades enzimáticas; el arsénico se acumula debido a su fácil reacción con las proteínas, y una dosis letal de arsénico para un adulto ronda entre 1 y 4 mg As/kg. (Castro, 2006).

En el caso del manganeso y del hierro, afectan las propiedades fisicoquímicas del agua, provocando mal olor y mal sabor; en Los Chiles se detectó que ambos elementos alcanzan el valor máximo admisible de 0.5 mg/L de manganeso y 0.3 mg/L de hierro (La Gaceta N°84, 2005), e incluso pueden superarlo. Sin embargo, estos dos metales no son malignos para la salud humana, únicamente presentan un problema para el abastecimiento de agua potable, por las variaciones en el sabor y olor del líquido, pero su presencia en el agua es indicativa de las condiciones oxidantes y reductoras del agua subterránea y por lo tanto puede influir en la calidad del agua.

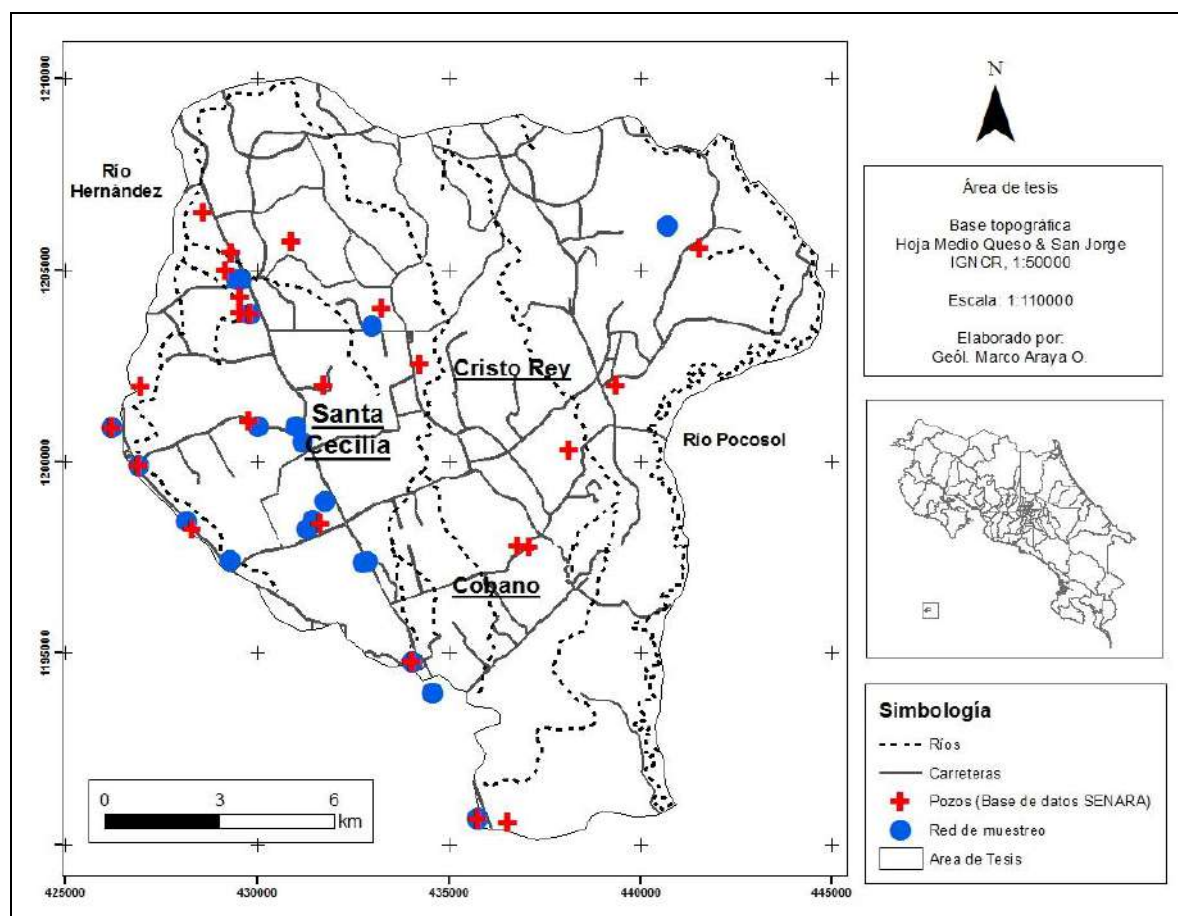
Por estas razones, es importante investigar las áreas afectadas del país para identificar las condiciones naturales que condicionan la ocurrencia del As, Mn, Fe y otros metales, para prevenir la contaminación del agua y establecer las posibles alternativas de remediación. Se requiere incrementar la investigación sobre el origen del arsénico, cómo este se moviliza en el acuífero y las interacciones con otros iones asociados, como con el Mn y el Fe; no es posible eliminar la concentración de As si no se conoce el comportamiento químico y la fuente que genera dichas concentraciones. Estos aspectos son clave incluso para la remediación eficiente de los acuíferos afectados.

Por lo tanto, teniendo en cuenta varias hipótesis de la movilidad y la fuente del As de origen natural y algunas de las especies asociadas, el problema se resume en la siguiente interrogante: *¿Cuáles son los procesos geoquímicos que favorecen la liberación natural y movilización del manganeso, hierro y arsénico en el agua subterránea del distrito del Amparo y alrededores, Los Chiles, Alajuela, Costa Rica?*





de aguas; y en el este se siguió la margen derecha del río Pocosol (Figura 4). El área total de la zona de estudio es de 223 km<sup>2</sup> aproximadamente.



**Figura 4.** Área de estudio (223 km<sup>2</sup>) delimitada por el río Pocosol y el río Hernández, y la red de pozos disponibles para el muestreo.

### 1.13 Vías de acceso

Desde San José se toma la ruta No. 118 a Grecia, posteriormente la ruta No. 141 a Naranjo y por último se toma la ruta No. 35 en Florencia de Alajuela hasta llegar al distrito de El Amparo de Los Chiles.

### 1.14 Clima

El área de estudio se encuentra en la región Climática Atlántica, en la vertiente norte limitada por las Cordilleras Volcánicas de Guanacaste y Central, el Caribe y la frontera política con Nicaragua (Quesada, 2007). En esta región las precipitaciones son elevadas y constantes por la influencia de vientos húmedos que entran por el Caribe, por lo tanto no es muy evidente la época seca, la cual puede tener una duración de 0 a 5 meses. En las llanuras, como la Llanura de Los Chiles, las precipitaciones son menores desde enero hasta abril (Figura 5) y de setiembre a octubre (Hernández *et al.*, 2005).

En la zona de estudio no existe ninguna estación meteorológica, por lo tanto se utilizan la información de las estaciones de Los Chiles y Upala, considerando que la información es válida para la zona ya que se encuentra en la misma región climática (Cuadro 3). Sin embargo, no se presenta mapa de la ubicación de estas estaciones por la lejanía al área de tesis.

**Cuadro 3** Datos de las estaciones meteorológicas

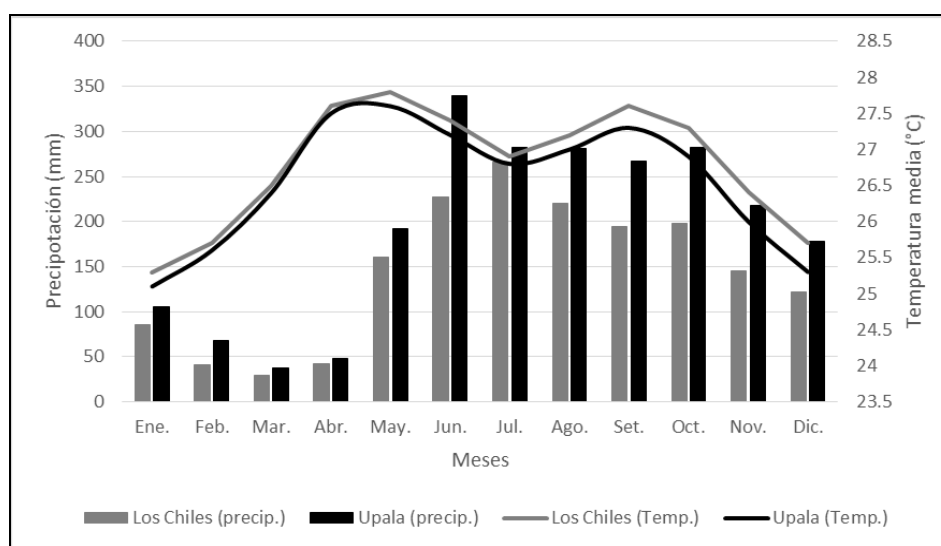
Estación	Ubicación	Coordenadas CRTM-05		Altitud (m.s.n.m)
		X	Y	
69 679	Upala	383 380	1201802	60
69 633	Los Chiles	423 508	1218277	40

Fuente: IMN (2019)

Producto de las lluvias persistentes la humedad relativa es muy alta, aproximadamente 86%, en las zonas montañosas hay nubosidad, lluvias, neblina y rocío permanente. Los meses más lluviosos presentan precipitaciones promedio mensuales de 400 mm a 200 mm, localmente en el área de estudio se estiman valores 150 mm y 200 mm. Los meses menos lluviosos presentan valores inferiores a 200 mm, y en el área de estudio se estiman entre 100 mm y 50 mm. La precipitación promedio anual se encuentra entre 144 mm y 190 mm (IMN, 2016).

La temperatura es alta y constante a lo largo del año, se estima que en promedio las temperaturas varían entre 27°C y 30°C. Aunque puede ser menor de 20°C en la Cordillera de Tilarán y Guanacaste (IMN, 2016).

En el área de estudio se estima que las temperaturas presentan valores de 25°C aproximadamente, en los meses de diciembre a febrero; y los otros meses varían entre 26°C y 28°C, ver Figura 5 (IMN, 2016). Se estima una temperatura promedio anual entre 26°C y 27°C.



**Figura 5.** Gráfico de la precipitación media mensual y de las temperaturas medias mensuales, según los datos de las estaciones meteorológicas de Los Chiles y Upala (IMN, 2016).

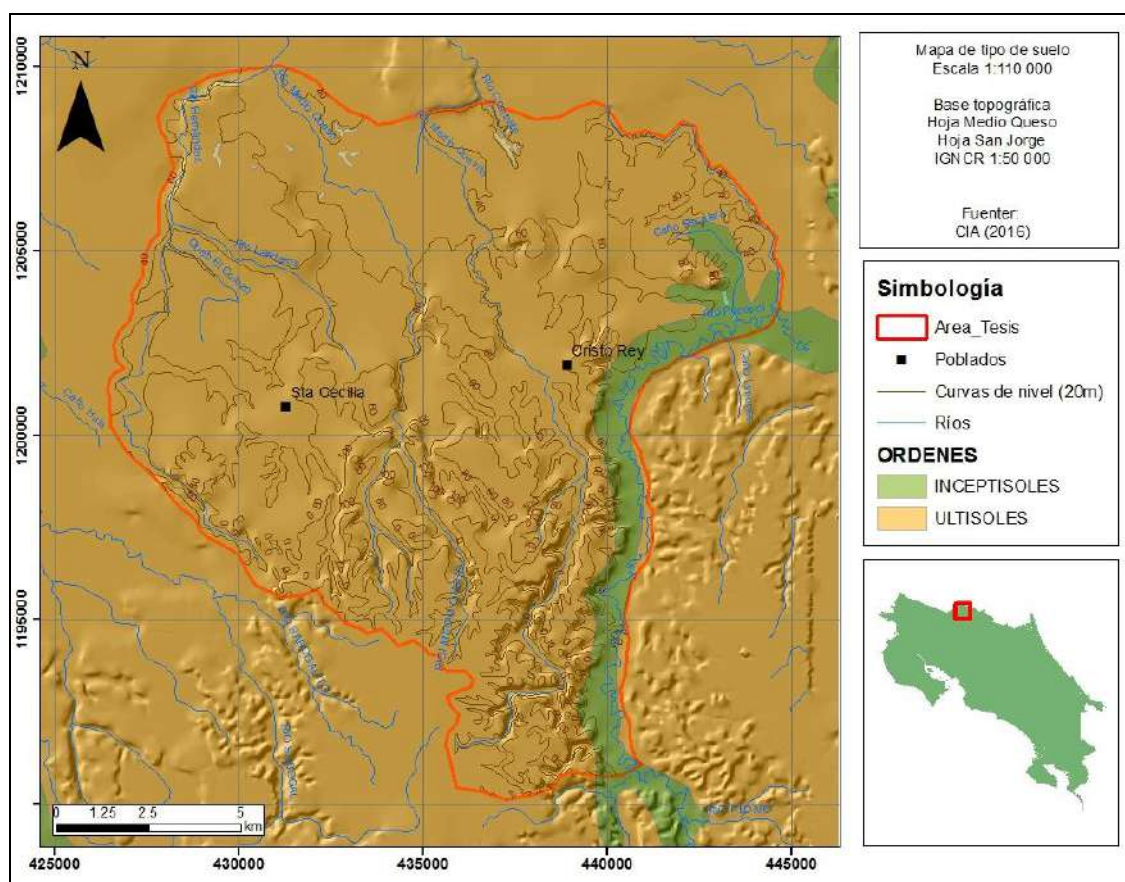
#### 1.15 Uso de suelo

Los suelos se correlacionan con el relieve, en la zona sur del área de estudio la topografía es moderadamente ondulada con pendientes entre 15 y 30%, y los suelos corresponden con ultisoles (Figura 6), donde el suelo presenta un horizonte rico en arcillas y materia orgánica (Mata, 1991).

Los ultisoles son los suelos más viejos y meteorizados del país y se encuentran en la zona norte Sarapiquí, San Carlos, Cutris. Son de color rojo y han sufrido a procesos de lixiviación. El origen de estos suelos se asocia a la influencia del agua por periodos

prolongados y en condiciones de altas temperaturas, donde el material parental se descompone a un material argílico, este horizonte de arcillas es producto de lixiviación donde la precipitación es mayor que la evapotranspiración, y el agua subterránea se encuentra profunda. La lixiviación produce pérdida de Na, K, Ca y Mg (cationes mono y divalentes) en cambio se da la acumulación de iones trivalentes como el Fe, Al y Si. Los colores rojos se deben a la hidratación del Fe. Mineralógicamente el suelo está compuesto principalmente de caolinita y óxidos de Fe y Al (Mata, 1991).

Hay una pequeña parte al este del área, a lo largo del río Pocosal (figura 6), donde se encuentran inceptisoles, este suelo se correlaciona con una topografía ondulada suave con pendientes entre 2 y 15%. Según origen los inceptisoles son producto de la meteorización de sedimentos aluviales, coluviales y generan mal drenaje en las zonas donde se encuentran. Mineralógicamente está compuesto de varios tipos de arcillas y minerales primarios (Mata, 1991).



**Figura 6** Mapa de órdenes de suelos en el área de estudio (Tomado de CIA, 2016)

## Capítulo 2: Contexto geológico, geomorfológico e hidrogeológico

El área de estudio, se encuentra en la cuenca del río Pocosol, la cual es drenada por el río Pocosol y sus tributarios, río Chambacú, río Chimurria, río Plomo, río Medio Queso y río Hernández (Figura 3); los cuales fluyen en dirección norte, desembocando en el río San Juan (Rojas *et al.* , 2011). A continuación se describe de forma general los principales rasgos tectónicos regionales que influyen en el área de estudio, las principales formaciones geológicas y las principales formas del terreno circunscritas en la zona de interés.

### 2.1 Marco Tectónico Regional

El marco tectónico regional se realizó mediante métodos indirectos y bibliografía debido a que en el campo no se pudieron hacer mediciones directas por el alto grado de alteración que ha generado espesores importantes de laterita ocultando los rasgos de fallas, pliegues y otros. La erosión es característica de una cuenca con levantamiento activo que se traduce en una peneplanización de la región.

#### 2.1.1 Fosa Mesoamericana

Es un límite tectónico ubica al oeste del país en el Océano Pacífico, y es donde se da la convergencia de la placa Cocos y la placa Caribe (Montero & Morales, 2005). En este margen se da la subducción de la placa Cocos bajo la placa Caribe a una velocidad estimada de 8 a 9,5 cm/año, (Figura 7) (Escalante & Astorga, 1994; & Montero y Morales, 2005) y con un ángulo menor a los 25° (Ballester et. al., 1995).

Esta subducción se da desde el cretácico superior, generando esfuerzos compresivos con rumbo suroeste-noreste (Montero & Morales, 2005) y como resultado se generaron los arcos interno y externo con tendencia noroeste-sureste y con extensiones entre 20 km y 50 km, paralelas a este margen tectónico (Escalante & Astorga, 1994); el arco interno corresponde con la región de valles y serranías en el interior del país, mientras que el tras arco corresponde con las llanuras aluviales de la zona norte (Figura 7) (Montero & Morales, 2005). La cordillera Tilarán-Talamanca está compuesta de volcanes activos e

inactivos, que durante el Terciario presentó un vulcanismo máfico, y hacia el plioceno se tornó más ácido (Ballester et. al., 1995).

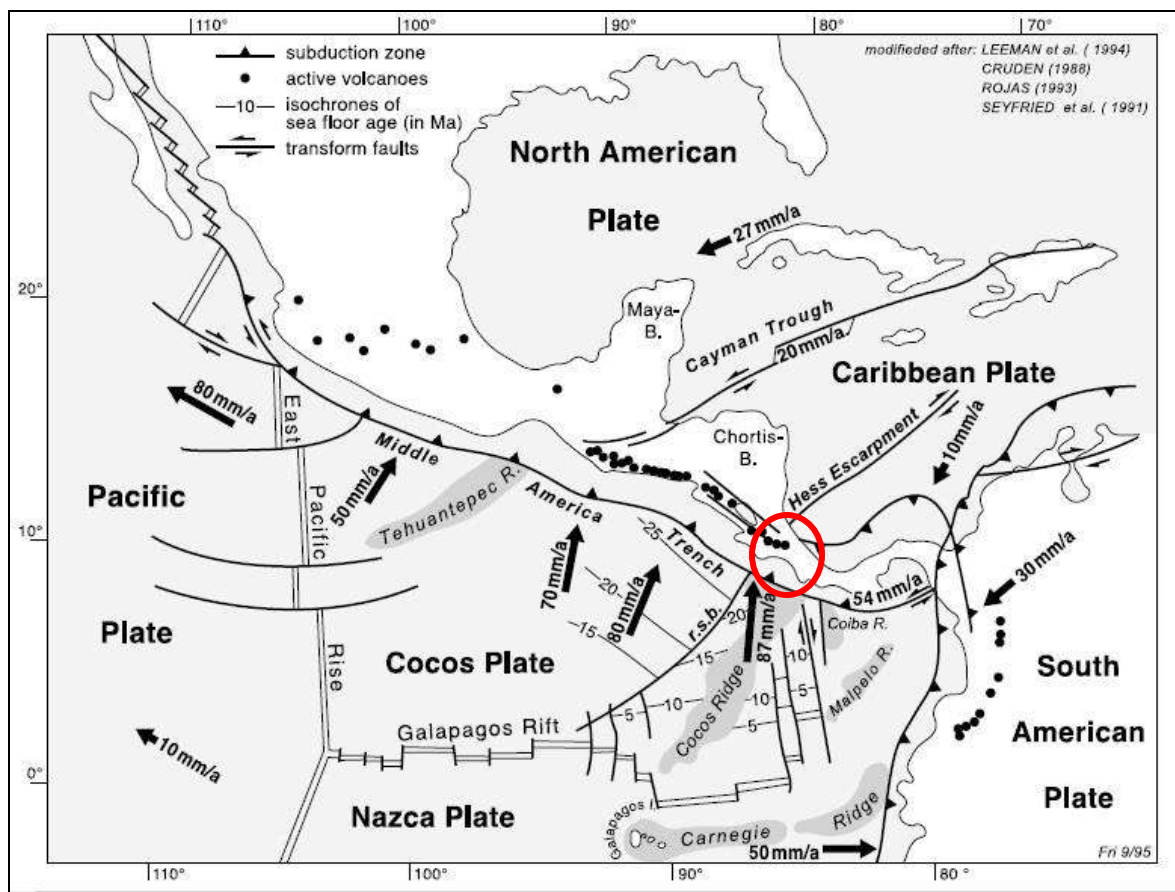
### 2.1.2 Escarpe de Hess

Este rasgo tectónico es interpretado como una traza de falla con movimiento transcurrente, que separa la cuenca de Colombia del levantamiento de Nicaragua (Frischbutter, 2002). Y se extiende hasta el pacífico del país, mediante la Falla Santa Elena. La actividad de la falla se concentró antes del Cenozoico (Figura 7).

### 2.1.3 Graben de Nicaragua

Es una depresión morfológica con dirección noroeste-sureste y que se extiende hasta la zona de ante arco del norte del país donde se encuentra la cuenca de San Carlos. Se interpreta como un graben tectónico debido al fallamiento strike slip paralelo a la costa que generó esfuerzos distensivos y por lo tanto fallas normales en dirección noroeste durante el Cretácico (Ballester et. al., 1995 & Fischbutter, 2002). En esta depresión producto de la subsidencia por las fallas normales, se dio un reajuste isostático relacionado con las rocas volcánicas Terciarias depositadas en el continente (Frischbutter, 2002) generando un sistema de grabenes durante el Neógeno (Escalante & Astorga, 1994).

Posteriormente esta depresión se llenó de sedimentos del Mioceno al Cuaternario, principalmente de sedimentos volcanoclásticos debido al vulcanismo efusivo asociados a la distensión (Escalante & Astorga, 1994). Estos depósitos Holocenos tienen espesores de hasta 2000 metros (Frischbutter, 2002).



**Figura 7.** Rasgos tectónico regionales (Tomado de Frischbutter, 2002).

#### 2.1.4 Arco de Sarapiquí

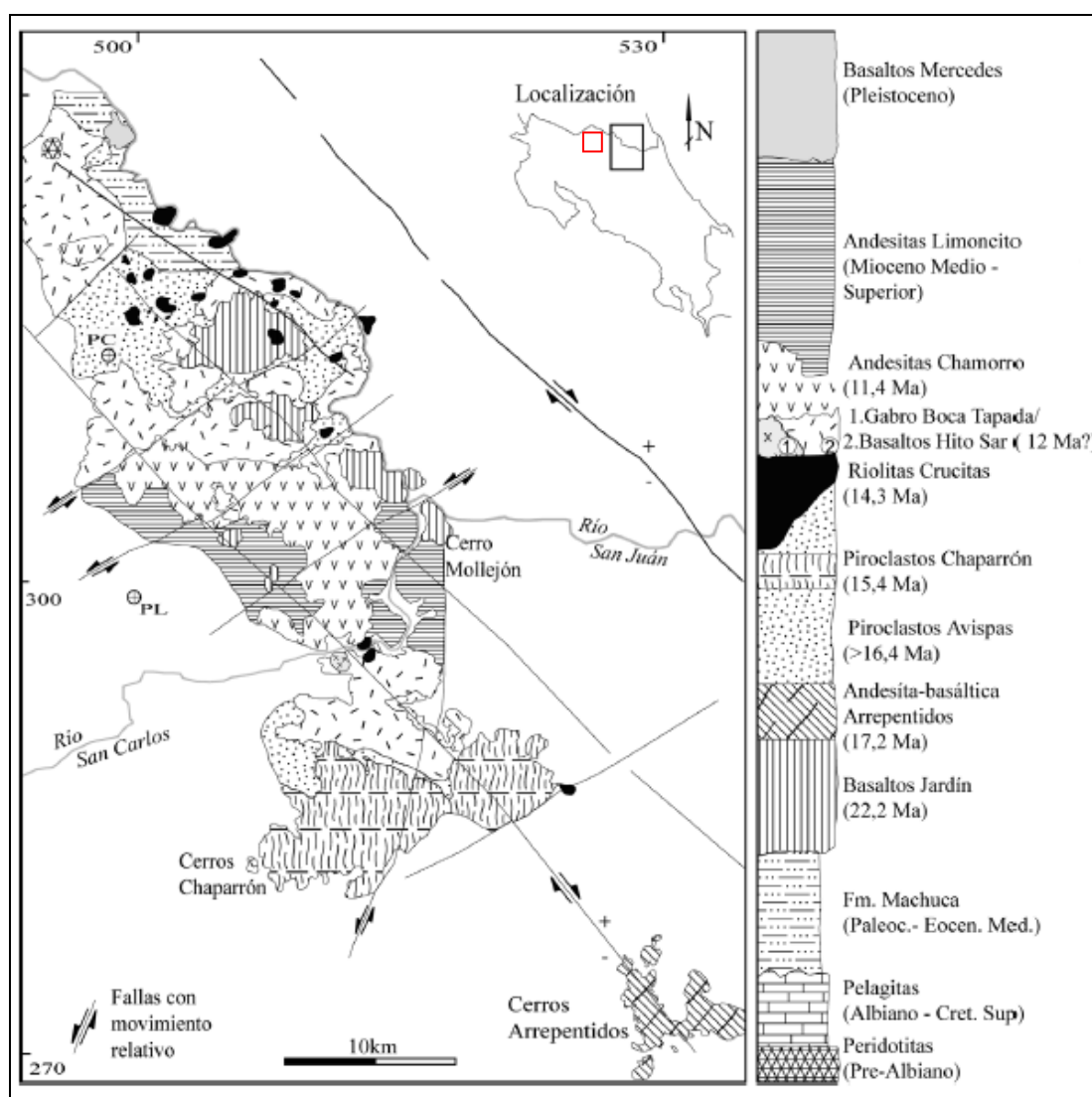
En la región norte de Costa Rica, se encuentran las llanuras de San Carlos, y en esta región se encuentra el relicto de un arco magmático (Gazel et. al., 2005). Según Dengo (1962) este arco es una extensión del graben de Nicaragua; Malavassi & Madrigal (1970) indican que el arco está compuesto por lavas de la formación Cureña; y Alvarado (1984) indica que las lavas tienen composiciones que van desde andesitas hasta basaltos y que incluye también materiales piroclásticos. Astorga (1991) indica que en el sector norte de las llanuras de San Carlos se encuentra el antiguo arco volcánico el cual está compuesto por rocas volcánicas del Neógeno que descansan sobre sedimentos del Paleogeno, y le otorga a esta estructura un origen tectónico (Figura 8).

El arco volcánico inicia su formación en el Mioceno, donde por los valores de U/Th bajos (0,4-0,6) se evidencia que los materiales son originarios de la subducción y fusión



de sedimentos pelágicos carbonatados, los cuales fueron depositados antes del cierre del istmo (Astorga, 1991).

Representa un segmento del arco magmático de Costa Rica, constituido por rocas de composición basáltica hasta riolitas. Los basaltos del inicio de la actividad volcánica son de carácter primario, y posteriormente debido al aporte de fluidos de la capa subducida la composición de los productos cambió. Las andesitas son producto de este proceso evolutivo, que evidencia la subducción de la placa con sedimentos pelágicos carbonatados (Gazel *et al.* , 2005).



**Figura 8.** Mapa geológico y columna estratigráfica del arco de Sarapiquí (Tomado de Gazel *et al.* , 2005).



### 2.1.5 Cuenca de San Carlos

Esta cuenca es un cuenca de intra arco según Escalante & Astorga (1994), pero según Ballesterio et. al. (1995) se ubica en la región de tras arco de Costa Rica; esta región se ubica en la región norte de Costa Rica y a su vez coincide con en el extremo SE del Graben de Nicaragua (Fischbutter, 2002); además la actividad sísmica es baja y escasa (Montero & Morales, 2005).

La cuenca tiene un área de 8000 km<sup>2</sup> que han sido llenados intermitentemente por sedimentos fluviales y marinos, alcanzando un espesor de hasta 6 km y se estima un gradiente geotérmico alto de 4,3°C/100m (Ballesterio et. al., 1995). La edad de formación de esta cuenca se estima en el Cretácico, y en el Neógeno se generan estructuras este-oeste debido a los esfuerzos compresivos, deformando las rocas Terciarias que rellenan la cuenca (Ibid).

Según los estudios realizados por Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE) en 1982, en la cuenca el fallamiento predominantes es en dirección oeste-suroeste. Dos depresiones principales se apreciaron dentro de la cuenca según métodos gravimétricos y magnéticos, la depresión de Florencia con más de 5 km de sedimentos post-Cretácicos rellenándola; y la depresión de San Jorge, con 3 km de profundidad aproximadamente (ibid). En contraste, la elevación Patasté es causada por intrusiones andesíticas hipoabisales (Ballesterio et. al., 1995). Según la información de la prospección geofísica, más específicamente sísmica de refracción y reflexión, se interpreta que en la cuenca hay flujos de lava y cuerpos intrusivos a 1 km de profundidad y a más de 2 km se encuentra el basamento (Pizarro, 1993).

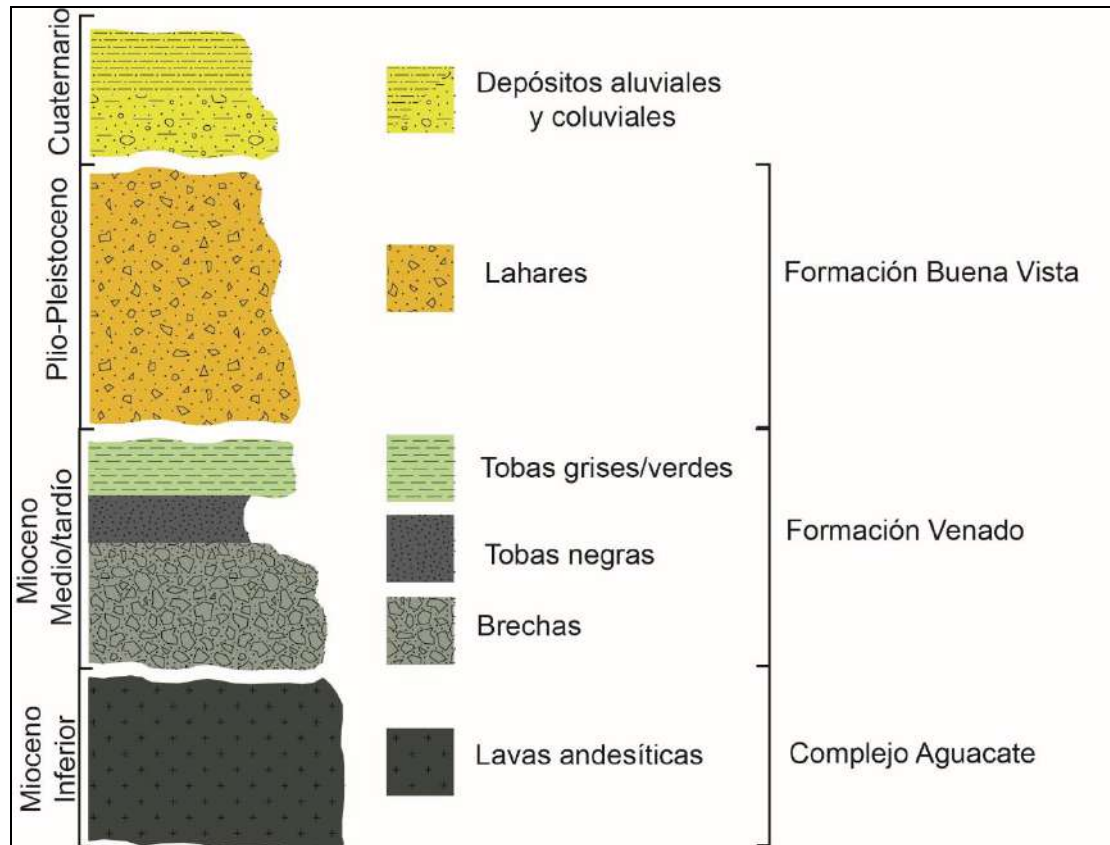
Las rocas más antiguas se asocian con lutitas calcáreas y tobáceas de la Formación Machuca (Escalante & Astorga, 1994); sin embargo en las perforaciones profundas realizadas por RECOPE (Pizarro, 1993), encuentran en la base las rocas del Complejo de Nicoya. Las unidades estratigráficas del Terciario Tardío corresponden con secuencias volcanoclásticas (Escalante & Astorga, 1994), producto del vulcanismo continuo y sedimentación que caracterizó la región de tras arco desde el Paleoceno (Ballesterio et. al., 1995). La actividad volcánica del Plio-pleistoceno es alcalina y está constituida por conos de poca altura, piroclásticos y lávicos (Montero & Morales, 2005).

## 2.2 Geología Regional

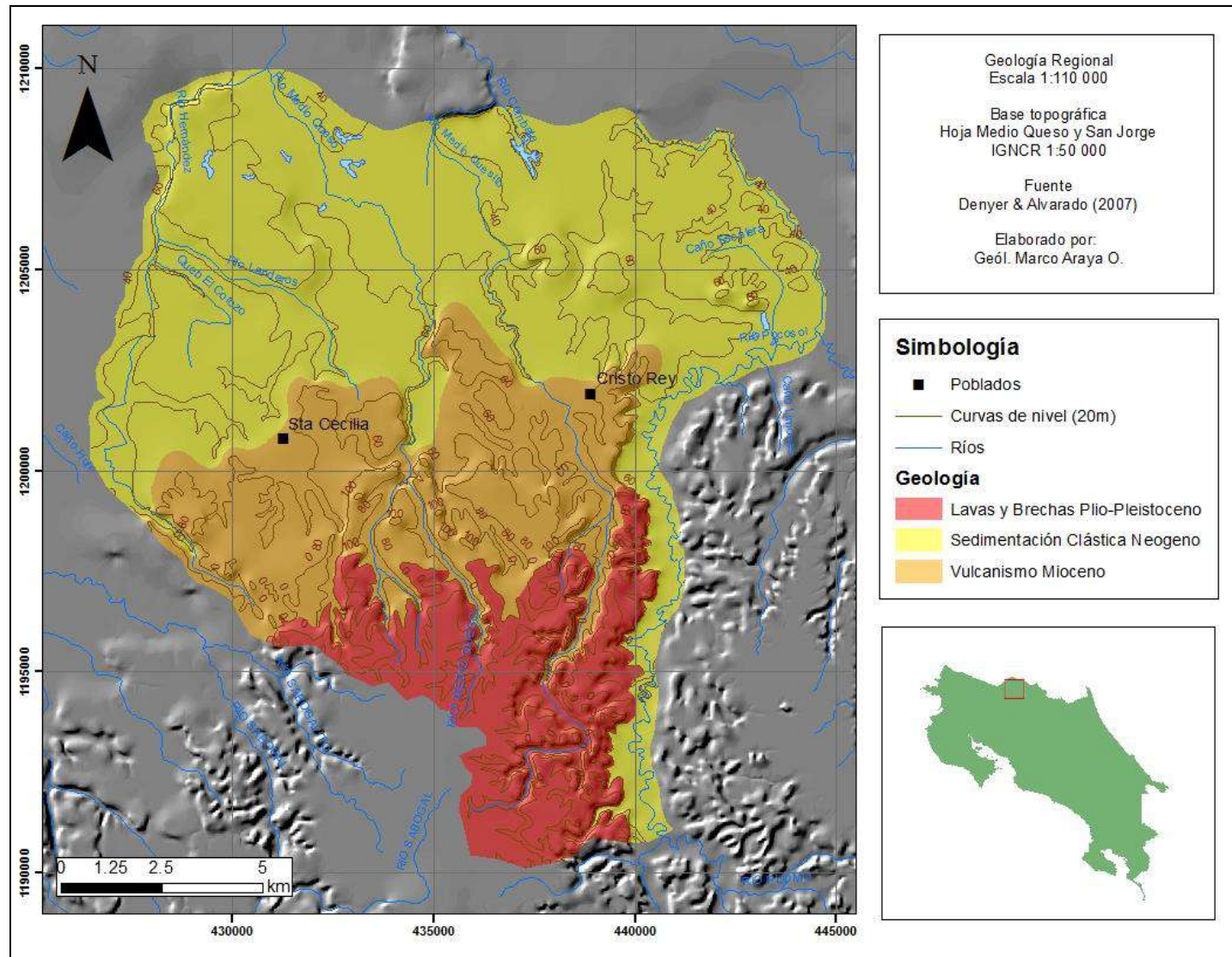
Denyer & Alvarado (2007) indican que las rocas de la cuenca corresponden a rocas ígneas volcánicas del Mioceno y Plio-pleistoceno, así como también rocas sedimentarias de talud continental del Paleoceno al Eoceno. Además en el sector norte de la cuenca se encuentran rocas sedimentarias de Holoceno (Figura 8).

En la cuenca de San Carlos, se realizaron perforaciones profundas durante la prospección petrolera realizada en los años 1922 a 1988, las cuales fueron registradas por Pizarro (1993); se utilizó la información del pozo Tonjibe perforado en 1988, el cual se ubicó en la hoja topográfica Medio Queso. La estratigrafía de la zona está compuesta por el basamento que corresponde con las serpentinitas del Complejo de Nicoya. Sobreyaciendo se encuentran rocas correlacionales al Grupo Aguacate (basaltos, andesitas y aglomerados volcánicos), con edad Mioceno inferior; debajo de este grupo se ubican 271 metros de lutitas, arenas y tobitas de la formación Loma Chumico (Albiano Tardío). Seguido se encuentran 300 metros de piroclastos y materiales volcánicos correlacionales con las formaciones cuaternarias de Cote y Buena Vista (Figura 9).

Por último, están depósitos de lutitas, areniscas tobáceas, calizas y horizontes de carbón pertenecientes a la formación Venado (Mioceno medio-tardío a Plioceno), con 800 metros de espesor aproximadamente (Figura 9).



**Figura 9.** Columna estratigráfica generalizada para la zona de estudio (Modificada de Obando, 1986 & Pizarro, 1993).



### 2.2.1 Complejo del Aguacate

Regionalmente se encuentra constituido por andesitas basálticas de extensión restringida, la cuales intruyeron la formación Venado (Obando, 1986) y tienen una edad que corresponde con Mioceno Inferior (Pizarro, 1993).

Macroscópicamente, son andesíticas negras de textura afanítica con fenocristales de plagioclasas, densas, duras y se meteorizan a colores amarillentos y arcillas. Microscópicamente tiene textura fina, con fenocristales aislados de plagioclasas sana y augitas, la matriz posee augita, plagioclasas microlítica, y magnetita; también clorita producto de la alteración de los ferromagnesianos algunas veces sustituyendo totalmente los cristales (Obando, 1986).

Las andesitas hipoabisales, son negras y con textura porfirítica, contiene fenocristales de plagioclasas y ferromagnesianos alterados. Se meteoriza a colores cafés rojizos, con plagioclasas muy arcillitizadas y amígdalas. Microscópicamente se trata de una andesita holocristalina con cristales idiomórficos a hipidiomórficos. Las plagioclasas con fuerte maclado y zonación; augita titanífera, magnetita, fantasmas y cristales de hornblenda cloritizados. Estas mismas Intruyeron la formación Venado e incluso los Lahares de la formación Buenavista, provocado una fuerte alteración hidrotermal, que se caracteriza por colores rojos, violetas y verdosos, en los depósitos sobreyacientes (Obando, 1986; & De la Cruz, 1994).

Las andesitas son lavas negras porfiríticas con fenocristales de plagioclasas, óxidos de hierro y vesículas. Presenta laminaciones de magnetita, paralelas y continuas. Y se meteorizan a arcillas rojizas con plagioclasas. Microscópicamente, tienen una textura hialopilítica fluida cristalina. Contienen plagioclasas con macla y zonación, augitas, en una matriz fluida con plagioclasas, augita, magnetita y vidrio (Obando, 1986).

### 2.2.2 Formación Venado

Es una unidad sedimentaria de granulometría variable depositada en ambientes de barra, laguna y estuario con una evidente influencia volcánica; está constituida por un

sistema carbonatado y otro silicoclásticos del Mioceno medio a tardío, con un espesor de 327 metros aproximadamente y un buzamiento entre 10° y 25° (Obando, 1986; Calvo & Bolz, 1987).

Las rocas son calizas, lutitas, limolitas, arenicas y conglomerados que presentan estratificación plana paralela que varía de gruesa a fina, laminaciones y estratificación cruzada que particularmente refleja una deposición en un medio de alta energía (Calvo & Bolz, 1987); las variaciones laterales y verticales, se interpretan como facies, dentro de las cuales se encuentran capas de carbón lignito con espesores de 1.2 metros y lutitas ricas en carbón (Obando, 1986; Calvo & Bolz, 1987).

Las rocas de esta unidad geológica se encuentran muy meteorizadas por lo que tiene una consistencia suave y poco consistente, además se caracterizan por un alto contenido de magnetita en las areniscas medias (Obando, 1986).

Las areniscas son de color gris, verde, gris azulado, café y hasta negro; meteorizadas presentan un color café amarillento producto de los óxidos de hierro. Mineralógicamente se observa plagioclasas, piroxenos y magnetita, también clastos de roca y pómez. La matriz es arcillosa y se encuentran poco cementadas. Las areniscas tobáceas presentan textura piroclástica y son de color gris claro, desde conglomerádicas, brechosas hasta masivas. Estos depósitos fueron ignimbritas vitroclásticas, flujos de ceniza y pómez, los cuales sufrieron re-trabajo (Obando, 1986).

Las lutitas de la formación presentan alta plasticidad, y colores que varían entre gris, verde, gris azulado y gris verdoso. Meteorizadas son de color café claro a café rojizo, igualmente por la alteración a óxidos de hierro. Además presentan intercalaciones de areniscas barrosas y conglomerados, poseen también lentes de arenisca fina a media con matriz arcillosa gris clara o blanca, incluso verde (Obando, 1986).

Conglomerados y brechas, son de color café a gris e incluso negras, con una matriz arenosa de granulometría gruesa a media. Los clastos volcánicos tienen diámetros que varían desde 1 cm hasta 1 m y son tanto angulares como subangulares; se encuentran en una matriz arenosa negra o café, la cementación es buena y los afloramientos se asocian a cañones y cascadas (Obando, 1986 & De la Cruz, 1994).

La calizas no aflora en el área de estudio, pero se consideran de ambientes someros y bajas salinidades debido a los fósiles que presenta (bivalvos, equinodermos, macroforaminíferos, foraminíferos bentónicos, gastropodos y balanús) y se clasifican como calizas bioclásticas, aunque también calizas arenosas de grano medio a grueso. Se encuentra bien estratificada con espesores que varían entre los 11 y 3 metros (Obando, 1986; & Calvo & Bolz, 1987).

### 2.2.3 Formación Buenavista

Sobreyace discordantemente la formación Venado y se le atribuye una edad del Plioceno-Pleistoceno. Compuesto por lahares arcillo-arenosos meteorizados con bloques de lava angulosas y redondeados y sin estructuras sedimentarias (Obando, 1986); Bergoeing & Protti (2006) también describen la formación como lahares, compuestos por arcillas rojas ferruginosas que envuelven bloques volcánicos de tobas, andesitas y basaltos, los cuales pueden ser métricos y presentan alteración esferoidal.

Estos lahares son ricos en material volcánico y se puede dividir entre lahar fino y lahar grueso, y debido a que los bloques son de mayor tamaño hacia el oeste, se estima que la fuente es en dicha dirección, apuntando a la cordillera de Guanacaste; están compuestos de bloques de lavas brechosos, envueltos en una matriz areno arcillosa rica en óxidos de hierro; debido a la meteorización son materiales suaves, arcillosos de color café rojizo producto de los óxidos de hierro y a veces con manganeso. Los clastos son angulosos hasta redondeados, debido a la alteración esferoidal; los bloques miden menos de 1 metro de diámetro (Obando, 1986).

Debido a la meteorización, los materiales son suaves y el color rojo de las arcillas se le atribuye a los óxidos de hierro, y también presenta manganeso en forma de vetas o precipitado en fracturas; y además presentan alteración hidrotermal causa de la actividad intrusiva de la zona, exhibiendo colores rojos, blancos, verdes y morados (Obando, 1986).

#### 2.2.4 Cuaternario

Compuesto por depósitos aluviales, que se encuentran a lo largo de algunos ríos más importantes de la zona, el material es arenoso, con grava y bloques redondeados a elipsoidales (Obando, 1986).



### 3 Capítulo 3: Marco Teórico

#### 3.1 Introducción: Compuestos inorgánicos naturales en el agua subterránea.

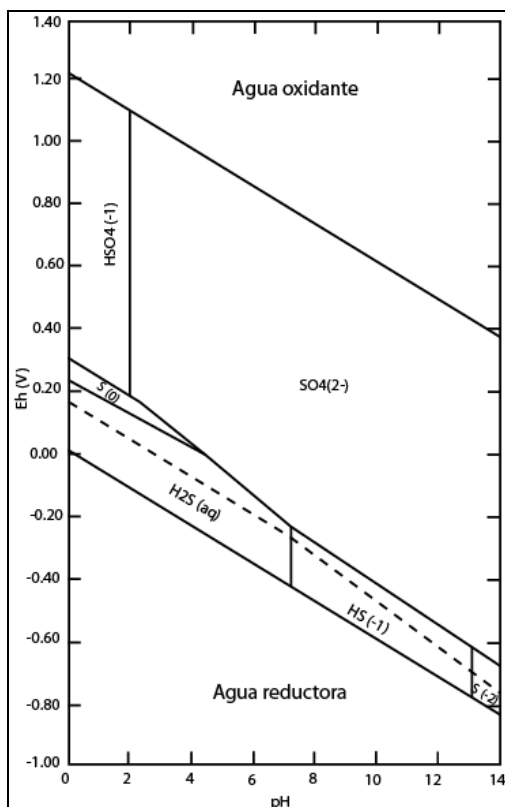
El agua subterránea es un solvente natural que se encuentra en contacto con materiales geológicos de diferentes composiciones, por esta razón tendrá cationes, aniones y especies no iónicas inorgánicas en disolución; los cuales forman parte de los sólidos totales disueltos y afectan la composición del agua subterránea (Fetter, 1999). Las especies en disolución que presentan concentraciones mayores, se denominan iones mayores y son el calcio, magnesio, sodio, potasio, cloruro, sulfato y bicarbonato; pero también el agua presenta iones o especies inorgánicas en pequeñas cantidades que afectan su calidad, como es el arsénico, fluoruro, nitratos, hierro, manganeso, estroncio, boro y otros (Fetter, 2001; Appelo & Postma, 2005).

Los iones pueden ser liberados o removidos de la solución por distintas reacciones que se dan por la interacción entre el agua y la roca (ibid). Las reacciones redox son parte de estas interacciones, donde uno de los elementos que participa cambia su estado de valencia (estado de oxidación) mediante la pérdida (oxidación) o ganancia (reducción) de electrones, por lo tanto mientras un elemento es oxidado otro es reducido, estas reacciones pueden ser catalizadas por microorganismos en muchas ocasiones. Los iones involucrados deben tener varios estados de valencia (Fetter, 1999; Appelo & Postma, 2005).

Por lo tanto, para conocer el ambiente redox del acuífero, se mide el potencial de oxidación (Eh) en el agua, el cual es la medida de electrones en solución, si el valor es positivo la solución es oxidante y si es negativo la solución es reductora. El pH es otro parámetro relevante en dichas reacciones redox, el pH es la medida de iones de hidrógeno o protones presentes, es una escala de 0 a 14, de más ácido a más básico respectivamente. Tanto el Eh como el pH controlan la composición del agua y que tantas especies iónicas o no iónicas inorgánicas estarán presentes en disolución (Fetter, 2001).

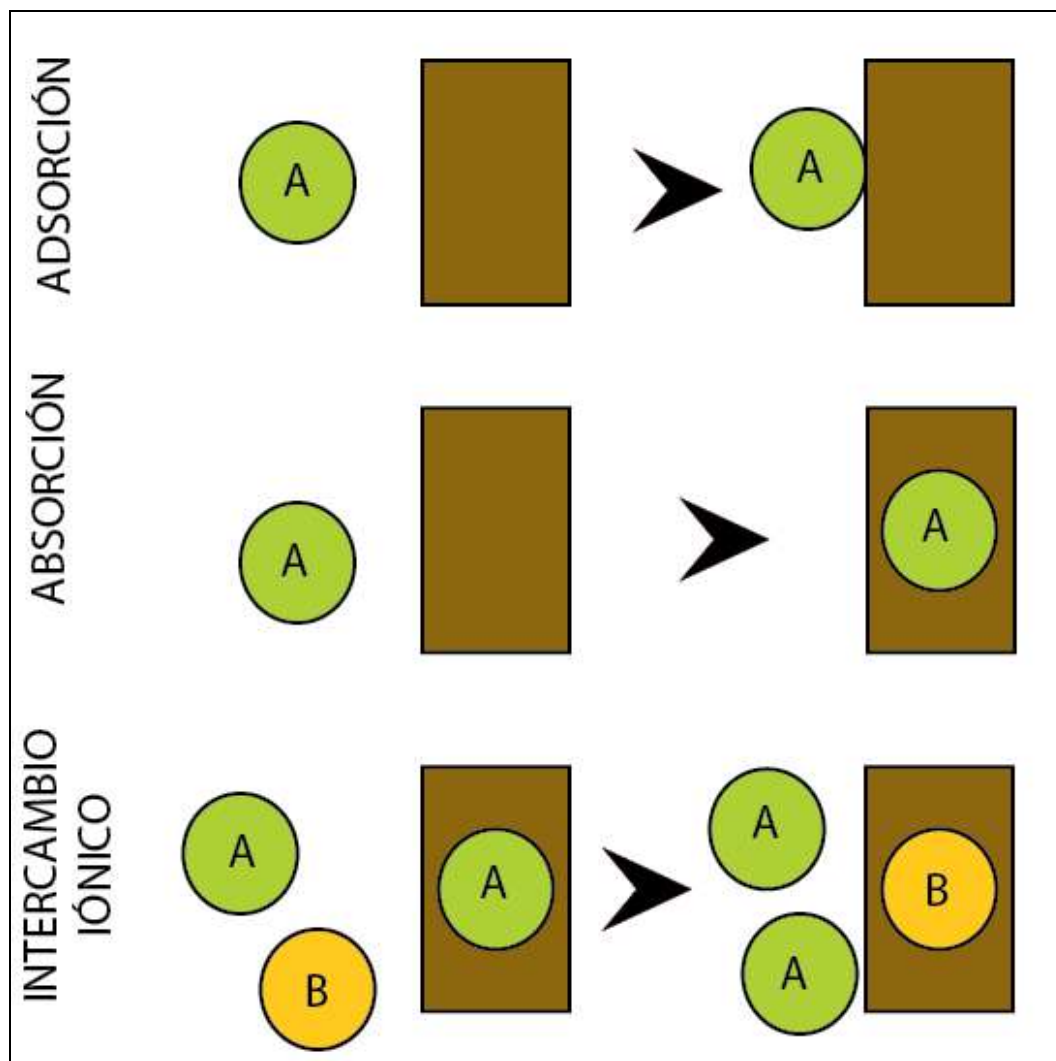
Los dos parámetros mencionados anteriormente, son relevantes para el análisis de contaminantes inorgánicos y se puede representar su relación mediante Diagramas Eh-pH. Si la solución tiene varios iones presentes pueden reaccionar para formar distintos





**Figura 12.** Diagrama Eh-pH de las especies del azufre (Tomado de Fetter, 1999).

Por último, para efectos de este estudio, están las reacciones de intercambio iónico y de adsorción-absorción (Figura 13). El intercambio iónico, también conocido como absorción selectiva, ocurre cuando los iones en solución son atraídos por una superficie sólida y reemplazan iones de dicha superficie. Pasa tanto en cationes como en aniones, pero el proceso de intercambio catiónico es dominante en la naturaleza donde iones divalentes sustituyen a iones monovalentes. Como parte de este intercambio iónico, los coloides orgánicos y arcillas pueden remover cationes metálicos (traza) y afectar la movilidad del metal (Fetter, 2001).



**Figura 13.** Procesos de adsorción, absorción e intercambio iónico que afectan la movilidad de especies iónicas en el agua subterránea (Modificado de Appelo & Postma, 2005).

Los metales pesados como cadmio, plomo, níquel y arsénico, pueden adsorberse o absorberse en superficies sólidas de carga variable, como los óxidos metálicos (Fe, Mn y Al) y materia orgánica que regulan la movilidad de los metales pesados y oxianiones; en estas superficies la carga (positiva o negativa) dependerá del pH de la solución. La meteorización de silicatos detríticos (anfíboles, biotita y arcilla e oxi-hidróxidos) liberan trazas y tienden a mantenerse fijos en las superficies a pH neutro, móviles en la solución a pH ácidos y en menor concentración a pH básicos (Appelo & Postma, 2005).

### 3.2 Aspectos fisicoquímicos del arsénico

El arsénico es un elemento metaloide pesado, que se encuentra en el agua subterránea como elemento traza y posee varios estados de oxidación, +5, +3, +1, 0, y -3; por esta razón es formador de oxianiones los cuales son atraídos por superficies positivas y repelidos por las superficies negativas, además son sensible a movilizarse en valores de pH típicos de las aguas subterráneas, los cuales se encuentran entre 6,5 y 8,5 (Fetter, 1999).

En Costa Rica, según el Reglamento de Calidad de Agua Potable publicado en la Gaceta No. 84 del 3 de mayo del 2005, presenta que las concentraciones de arsénico tienen un valor máximo admisible de 0,01 mg/L (10 ug/L), otros elementos de interés están de igual forma regulados, estableciendo valores de 0,5 mg/L para el manganeso (Mn); 0,3 mg/L como valor máximo admisible para el hierro (Fe); se mencionan estos tres valores por ser las especies de mayor relevancia para el agua potable en la zona de estudio.

La ocurrencia del As en acuíferos se da como especie disuelta, como oxianiones con dos estados de oxidación, As trivalente ( $\text{As}^{+3}$ ) y As pentavalente ( $\text{As}^{+5}$ ), ambos son móviles y presentan variedad de aniones en los que se disocian y movilizan por el agua, aunque el arsenito es más móvil y tóxico (Ilgen *et al.*, 2011). El estado de oxidación del arsénico va a controlar la movilidad del mismo, y el estado de oxidación está controlado por las condiciones redox (Eh y pH), el contenido de materia orgánica, procesos adsorción-desorción, precipitación-disolución y la presencia de iones como azufre, hierro, manganeso y aluminio; por ejemplo, la presencia de azufre favorece condiciones reductoras y ácidas lo que genera la precipitación de sulfuros con arsénico (Lillo, s.f.).

El arsénico pentavalente predomina en aguas superficiales (oxigenadas), se encuentra como  $\text{HAsO}_4^{2-}$  en soluciones con pH mayores a 6,9 y como  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  en soluciones con pH menores a 6,9; estas especies además presentan alta retención por adsorción-absorción a pH bajos y baja retención a pH altos; en el caso del arsenito ( $\text{As}^{3+}$ ) se presenta como  $\text{H}_3\text{AsO}_3$  en soluciones con pH menores a 9,2 y como  $\text{H}_3\text{AsO}_3^-$  en pH mayores a 9,2 (Appelo & Postma, 2005).

La mineralogía es un factor importante en la presencia y movilización del As, hay muchos minerales que contienen arsénico, principalmente sulfuros (rejalgar, oropimente, cobalita, arsenopirita, pirita, calcopirita, galena y marcasita), también se presentan altas concentraciones de arsénico en los óxidos y oxi-hidróxidos de hierro, manganeso y aluminio. Por lo tanto, son los minerales formadores de roca como los silicatos (biotita), carbonatos, óxidos (cuarzo) y sulfuros, son fuente de As (Appelo & Postma, 2005). Las cenizas volcánicas, ignimbritas, andesítas, dacítas entre otras, son rocas muy reactivas que pueden liberar cantidades importante de As al agua subterránea (Lillo, s.f.; Appelo & Postma, 2005).

Los principales mecanismos de liberación y movilización del arsénico son: oxidación de sulfuros, disolución de óxidos e oxi-hidróxidos de hierro y manganeso, desorción en condiciones oxidantes y pH alto, desorción y disolución de óxidos y oxi-hidróxidos en condiciones reductoras, desorción y reducción de superficie específica en la fase sólida y desorción por reducción en la carga de superficie de la fase sólida (Lillo, s.f.).

### 3.3 Fuente, liberación y movilización del arsénico

En la corteza inferior el contenido de As es de 1,3 mg/Kg, en la corteza superior de 2-5 mg/Kg y en basaltos de dorsal oceánica se estiman valores de 28 mg/Kg, lo que evidencia que el arsénico natural proviene de las rocas (Mukherjee *et al.*, 2013). Por lo tanto, se deben analizar los procesos geodinámicos regionales, y se debe tomar en cuenta los procesos tectónicos, geoquímicos y biológicos (*ibid*). Si se toma en cuenta el marco tectónico de subducción, las rocas ricas en As son consumidas y ascienden al continente como fluidos hidrotermales, o mediante el vulcanismo que generó rocas (andesítas, basaltos y riolitas) y depósitos de ceniza con cuarzo, biotita y feldespatos en una matriz vidriosa, ambos ricos en especies del arsénico, las cuales posteriormente son meteorizadas (*ibid*).

De esta forma, las principales fuentes del arsénico se asocian a zonas que presentan vulcanismo activo o inactivo, magmatismo, radioactividad, metamorfismo o fallamiento, liberando concentraciones de As altas y contaminando los acuíferos mediante flujo ascendente, vapor ascendente que se condensan cerca de la superficie, o disolución del As a partir de la roca (López *et al.*, 2012).

La interacción del agua meteórica con los sedimentos volcánicos del Terciario es una de las principales fuentes, donde los fragmentos de vidrio volcánico, cenizas y micas son las principales fuentes de As (García *et al.* 2009; Altamirano & Bundschud, 2009; Baba & Sozbilir, 2012). Dentro de las principales rocas relacionadas con concentraciones anómalas del metaloide, se encuentran rocas volcánicas terciarias de composición intermedia a ácida como ignimbritas, tobas, andesita, dacítas y basáltos, con alto contenido en metales alcalinos y vidrio volcánico, este último considerado como una de las principales fuentes del arsénico (Altamirano & Bundschud, 2009; Ilgen *et al.* , 2011; Mukherjee *et al.* , 2013).

Una de la fuentes de arsénico en acuíferos son los flujos geotermales ascendentes ricos en elementos traza; las aguas geotermales ascienden a la superficie de manera natural por ser menos densas que el agua fría, siendo un medio de movilidad del As hacia los acuíferos más someros, donde se han encontrado concentraciones de hasta de 30 mg/l y conductividad eléctrica entre 8-15  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , dichos fluidos termales presentan pH neutro (7-7,8) y son ricos en cloruro y sílice, producto de lixiviación de andesitas (Hammarlund & Piñones, 2009).

En zonas de tectonismo intenso, las concentraciones altas coinciden con las zonas de fractura, estableciendo estas zonas como un factor importante en la movilización arsénico, siendo también el hidrotermalismo que ocurre en las fallas y cuerpos intrusivos una fuente importante (Gutiérrez- Ojeda; García *et al.* 2009; Altamirano & Bundschud, 2009).

Los cambios en el sistema, como variaciones en el pH, Eh, temperatura y presión dominan la el intercambio iónico y equilibrio mineral (García *et al.* , 2009), y por lo tanto rigen la distribución de las diferentes especies del arsénico; donde el arsenito ( $\text{As}^{+3}$ ) predomina en ambientes reductores, siendo más móvil y es común en fluidos geotermales profundos; mientras que el arsenato ( $\text{As}^{+5}$ ) presenta menos movilidad y predomina en ambientes oxidante, o donde se da mezcla de aguas geotermales con acuíferos someros oxigenados. En la relaciones con el pH se observa una tendencia de sobresaturación de As en soluciones con pH ácidos; con el Eh se aprecia que cuando el Eh es positivo hay oxidación y el arsénico se presenta como arsenato, y con Eh negativo hay reducción y el arsénico se presenta como arsenito (Ilgen *et al.* , 2011). Por lo tanto, el pH controla la

disolución mineral, oxidación de piritita y reacciones de precipitación e hidrólisis (Tabelin *et al.*, 2012).

Estos cambios en el sistema, controlan la precipitación o disolución de oxi-hidróxidos de Fe, Mn, y Al; y la actividad microbiana, la cual reduce los sulfatos, provocando co-precipitación de As (López *et al.*, 2012). Por lo tanto, si los óxidos e hidróxidos de Fe, Mn y Al adsorben arsénico y atenúan su movilidad, la disolución de los mismos aumenta su movilidad (Hammarlund & Piñones, 2009; Ilgen *et al.*, 2011). Por ejemplo, un aumento en el carbono orgánico en la zona saturada, aumentará la actividad microbiana generando condiciones reductoras en el acuífero, estas condiciones llevan a un aumento en la concentración de As, Fe y Mn en solución, debido a la disolución de oxi-hidróxidos a pH ácidos; mientras que el sistema en condiciones naturales posee concentraciones bajas de As, Fe y Mn, debido a los métodos de atenuación naturales, como sorción por medio de óxidos de Fe, Al o Mn y co-precipitación de As (Thomas He *et al.*, 2010).

Las concentraciones altas de arsénico se encuentran asociadas a aguas Cloruradas sódicas (Na-Cl) que han estado en contacto con la roca un periodo largo de tiempo, lo que evidencia la relación directa entre tiempo de residencia del agua y las concentraciones altas de As (López *et al.*, 2012). En el caso de campos geotérmicos el tiempo de residencia es muy corto por lo que no le permite al fluido cambiar su composición química y la oxidación del As es menor, permitiendo concentraciones e arsenito en ambientes oxidantes (Hammarlund & Piñones, 2009).

Otro factor importante en la movilidad es la asociación con iones disueltos, se ha determinado que altas concentraciones en sólidos disueltos, como  $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Na^+$ ,  $B$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $SiO_2$ , carbono orgánico disuelto,  $H_2S$  y  $Li$  coinciden con las zonas con mayores concentraciones de As; y relaciones negativas con el bicarbonato y el oxígeno disuelto (Gutiérrez- Ojeda, 2009; Hammarlund & Piñones, 2009; López *et al.*, 2012), por lo que se comportan como elementos indicadores; otros elementos asociados son el Mo, Cr, V, Se y Sb los cuales se comportan como análogos al As (Vinson *et al.*, 2011).

Se han determinado relaciones entre iones mayores presentes y agua con arsénico, donde los fluidos geotérmicos se relacionan con  $Na^+$ ,  $K^+$  y  $Cl^-$ , mientras que la mezcla entre agua geotérmica y meteórica, se relaciona con  $Ca^+$ ,  $K^+$ ,  $Na$ . El ion cloruro se utilizó



como un marcador, el cual tiene una relación directamente proporcional con el As (Ilgen *et al.* , 2011). Como se menciona anteriormente, López *et al.* (2012) relaciona las altas concentraciones de Cl,  $\text{HCO}_3$  y sílice junto con altas temperaturas con la disolución y movilización del arsénico. Las concentraciones de los iones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  dependen del tiempo de residencia, en el caso del calcio retarda la liberación de As (V) al formar capas con carga positiva, mientras que el sulfato tiene efectos negativos en la adsorción del arsénico debido a su carga negativa (Tabelin *et al.*, 2012).

## Capítulo 4: Resultados

En el área de estudio, la cual corresponde a 233 km<sup>2</sup>, la geología corresponde con brechas, conglomerados y tobas producto del vulcanismo del Mioceno (29-7 Ma) en el sector sur y al norte se encuentran depósitos del Plio-Pleistoceno (2,1 – 1,0 Ma) y sedimentos continentales del Cuaternario (Denyer & Alvarado, 2007), (Figura 10). Además, según los mismos autores, en la zona la estratigrafía se inicia con lavas andesíticas de la unidad Machuca pertenecientes al Complejo del Aguacate, compuesto por materiales volcánicos y lavas andesíticas a basálticas del Mioceno Inferior, sobreyacido por la Formación Venado, compuesta por calizas, areniscas bioclásticas litorales del Mioceno junto con areniscas tobáceas, tobas líticas, lutitas, conglomerados litorales y sublitorales también del Mioceno. Y finalmente sobreyaciendo se encuentran los depósitos continentales y palustres del Holoceno.

### 4.1 Geomorfología Local

La geomorfología de la zona se divide en dos geoformas predominantes que incluyen laderas denudacionales y llanura aluvial (Figura 14).

Las laderas denudacionales se encuentran compuestas por depósitos tobáceos de la Formación Venado y se encuentran cascadas y ríos encajados, principalmente en zonas donde la unidad geológica corresponde con las brechas y tobas líticas de la misma formación. Esta unidad se delimitó con ayuda de modelos de sombras e interpretación de las curvas de nivel cada 20 m en escala 1:50 000 (IGNCR), además se correlacionó con observaciones de campo de las diferencias en el relieve.

Esta unidad geomorfológica se encuentra delimitada hacia el sur por una falla inferida con dirección este-oeste con tendencia noreste-suroeste. Esta falla inferida se delimita con ayuda de la geomorfología, las curvas de nivel y los perfiles geofísicos donde se evidencia una inconformidad en las capas definidas.

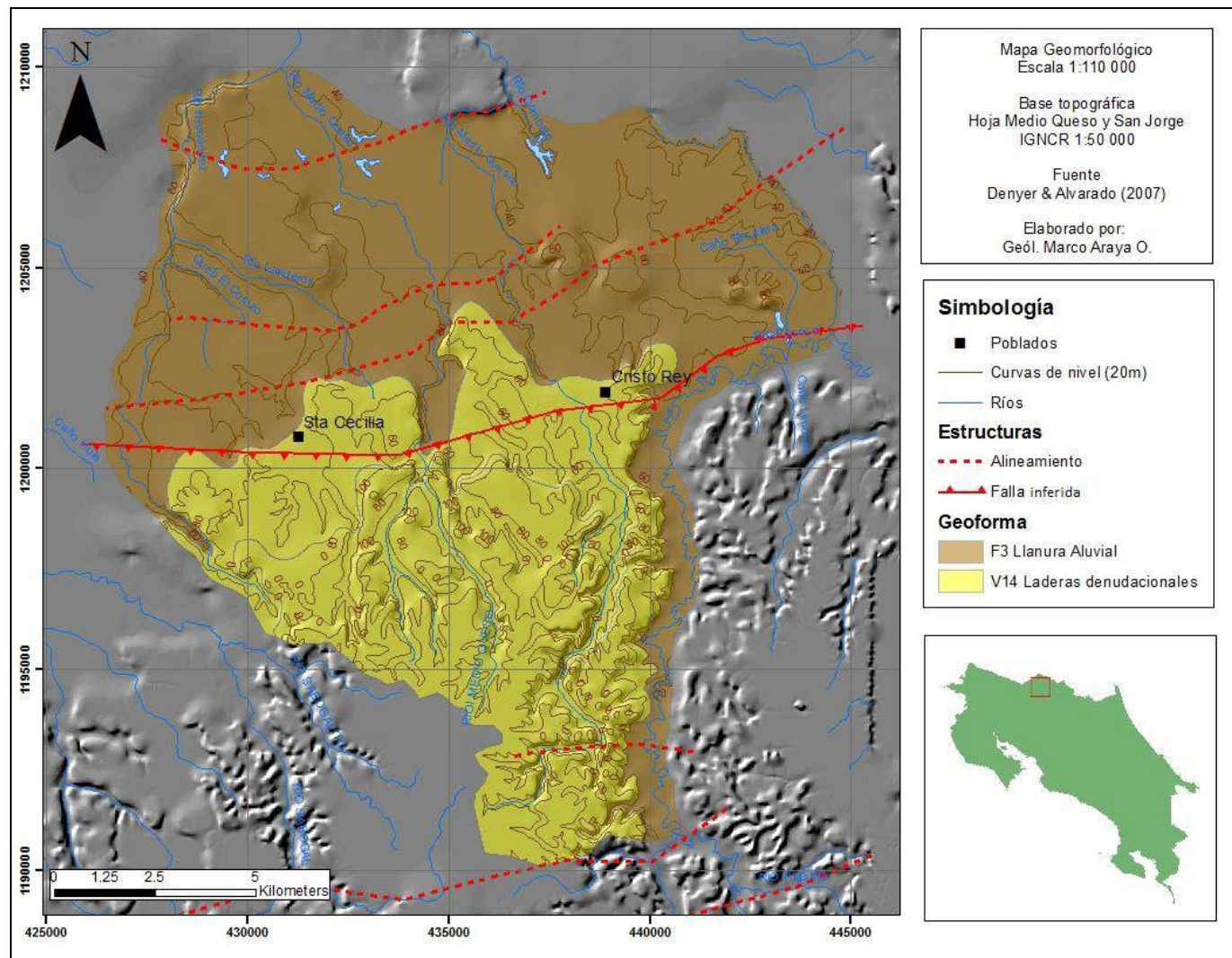
Hacia el norte se encuentra la unidad de llanura aluvial, la cual se caracteriza por un relieve plano compuesto por terrazas fluvio-lacustres, constituidas por depósitos arcillosos producto de la erosión. Esta unidad es coincidente con la unidad definida por Bergoeing &

Protti (2006). Localmente, el sitio de estudio se encuentra en una llanura aluvial que se asocia a una extensión del lago de Nicaragua, por lo tanto, es una expresión morfológica producto del graben de Nicaragua; esta llanura presenta una elongación en dirección noreste-suroeste.

En la parte alta sur del área de estudio se encuentran laderas denudacionales de origen volcánico donde se encuentran los depósitos tobáceos de la formación Venado. Además, se observan lineamientos y una falla inferida con dirección este-oeste (Figura 14).

Ambas unidades geomorfológicas se delimitaron con base en las unidades geológicas, ya que la litología es la principal variable en el control geomorfológico, además del control tectónico que se asocia a la falla inferida que se delimita en la zona.

A partir de las curvas de nivel cada 20 m, escala 1:50 000; se construyó un modelo de elevación digital con escala 1:110000, y se identificaron distintos rasgos geomorfológicos que se describe a continuación (Figura 14).



#### 4.1.1 Terrazas fluvio-lacustres

Entre el Pleistoceno y Holoceno, los diferentes efluentes del antiguo lago de Nicaragua, depositan sedimentos de composición arcillosa, producto de la erosión de los materiales volcánicos de las formaciones Buenavista y Venado. En la zona se encuentra una terraza lacustre que se extiende en dirección NE-SW, la cual está compuesta por arcillas rojas con manchas blancas, con al menos 10 metros de espesor y componen la llanura aluvial. Subyaciendo este depósito se encuentran arcillas grises lacustres con 1 metro de espesor (Bergoeing & Protti, 2006).

En la zona se observa un relieve controlado por las formas denudacionales, tanto de origen aluvial como volcánico. Al sur del área de estudio se observan flujos de lava, que se expresan como colinas denudacionales de origen volcánico; hacia el norte y alrededores del río Pocosol (al este del área), se encuentra una llanura aluvial, las cuales se caracterizan por ser muy planas y con mal drenaje, tiende a haber estancamiento y/o inundaciones. En esta misma llanura se observan varios cerros, los cuales se clasifican como parte de los flujos de lava, los cuales fueron erosionados dejando estos cerros aislados, aunque no son de gran altura se pueden diferenciar fácilmente al encontrarse dentro de la llanura aluvial.

#### 4.1.2 Cascadas y ríos encajados

Se asocia con las brechas o tobas líticas de la Formación Venado. En el sur del área de estudio se observa que el relieve tiene una topografía controlada por la litología. Estas rocas son consolidadas por lo que se asocian a cascadas y ríos encajados con paredes casi verticales. Geomorfológicamente se definen como llanuras denudacionales.

#### 4.1.3 Lineamientos y falla inferida

En el área de estudio se definen lineamientos basados en la geomorfología y en la red de drenaje, tanto en la zona sur como en hacia el norte del área; donde se ven desplazamientos en los cauces de los ríos Hernández, Landeros, Medio Queso, Medio Quesito y Pocosol. Debido a que no se observaron evidencias en el campo no se clasifican como fallas sino como lineamientos, la falta de evidencia se debe a la

meteorización avanzada de las rocas en la región y a la cobertura de sedimentos cuaternarios de gran espesor. La dirección general de esos lineamientos es E-W, con tendencia noreste-suroeste.

Con ayuda de los perfiles de geofísica, se establece una discontinuidad que coincide con el desplazamiento hacia el este del río Pocosol, entre otros desplazamientos menos evidentes de ríos y quebradas en la zona, se puede definir una falla inversa en la parte media del área de estudio, coincidiendo con las localidades de Santa Cecilia y Cristo Rey.

Según la interpretación, el bloque norte se levanta como se observa en el informe geofísico y además autores como Denyer *et al.* (2009) han trazado la misma falla, sin otorgarle un nombre específico pero si la definen como una falla inversa del Terciario y/o Cretácico. Por lo tanto en este estudio se determina únicamente como una falla inferida.

#### 4.2 Geología Local

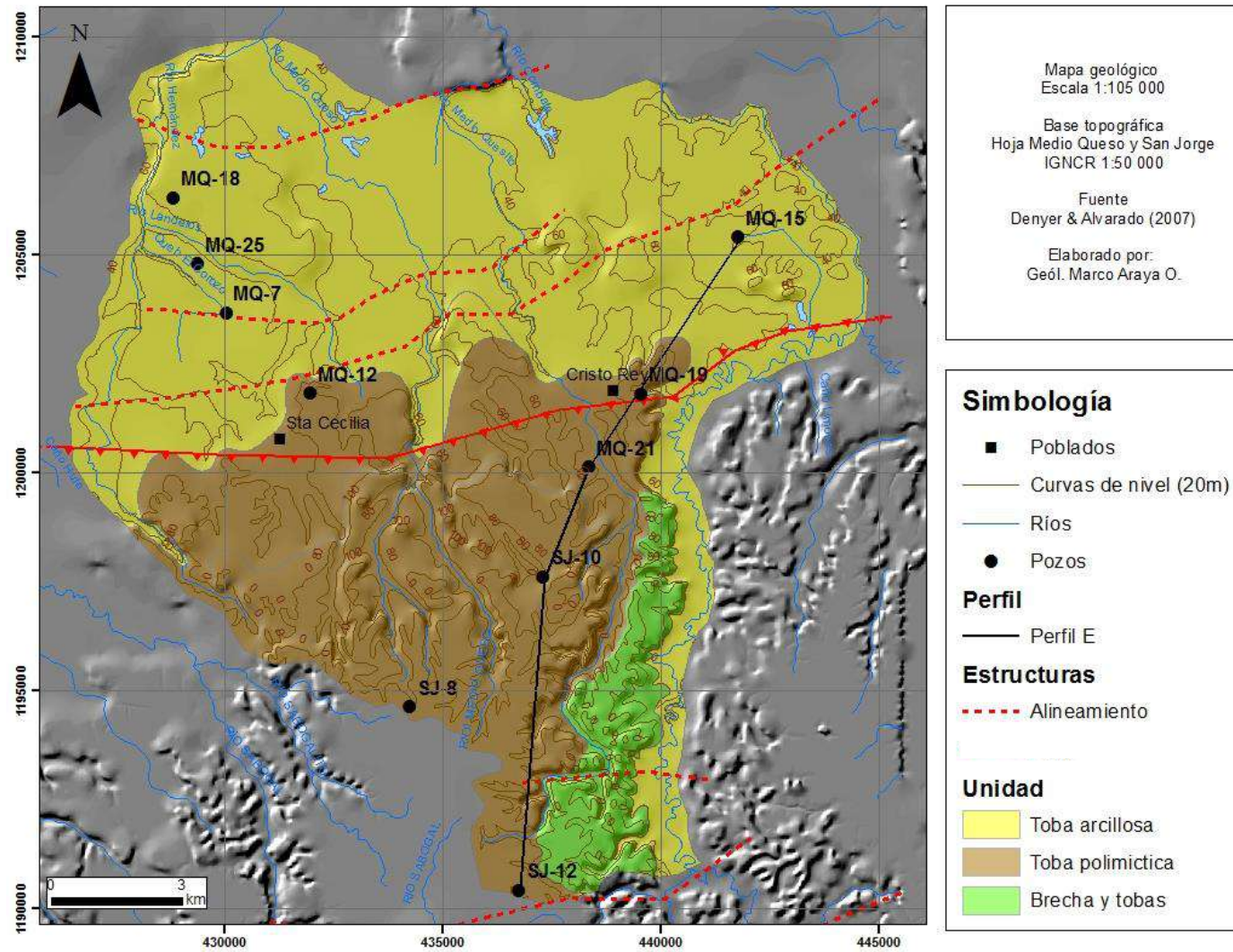
La geología de la zona se define con la información obtenida de los afloramientos analizados y con la información litológica de los pozos, con la cual se define una estratigrafía donde se encuentran las brechas y tobas líticas de la formación Venado, la cual según las secciones petrográficas se define como toba lítica andesítica con pómez y matriz hialino cristalina (ver anexo – SJ 10ª 13/1/16), y los clastos de la brecha son principalmente de andesita basáltica con fenocristales de augita. Asociado se encuentran depósitos de tobas cristalinas. Según Obando (1986) la formación Venado está compuesta por brechas, areniscas y limolitas que coinciden con la secuencia piroclástica que se describe en este estudio, por lo tanto se asignan las litologías descritas a dicha formación.

Los autores Obando (1986) y Bergoeing & Protti (2006) describe la formación Buenavista como Lahares arcillo arenosos con bloques de lava andesítica y basaltos, los cuales los dividen en Lahares finos y gruesos. Esto es coincidente con las litologías descritas en este estudio, donde se delimita una unidad de tobas polimícticas (Lahares gruesos) los cuales se encuentran compuestos por limos arcillosos de color rojizo con bloques de lava de composición andesítica-basálticas a basaltos. Y más hacia el norte se encuentra la unidad tobas arcillosas (Lahares finos), aquí se describen arcillas de color rojizo con

manchas de color gris o blanco, esto se asocia a la alteración hidrotermal típica de la zona, la cual es mencionada en el estudio de los autores mencionados anteriormente.

Se definieron unidades informales según la composición del material geológico; en el área de estudio se distinguieron tres materiales, los cuales conforman las siguientes unidades: Unidad tobas limos arcillosos, Unidad de tobas polimíctica y la Unidad de brechas y tobas (Figura 15).



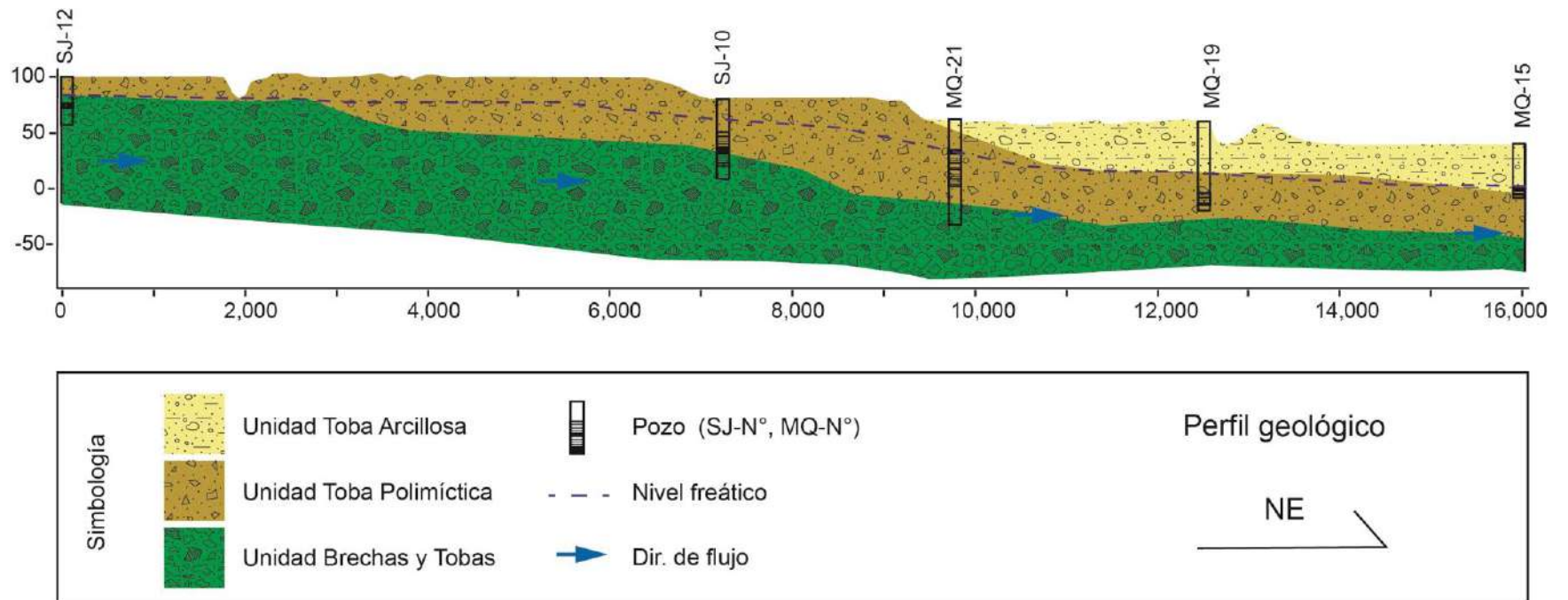


**Figura 15.** Mapa geológico local del Amparo y alrededores.

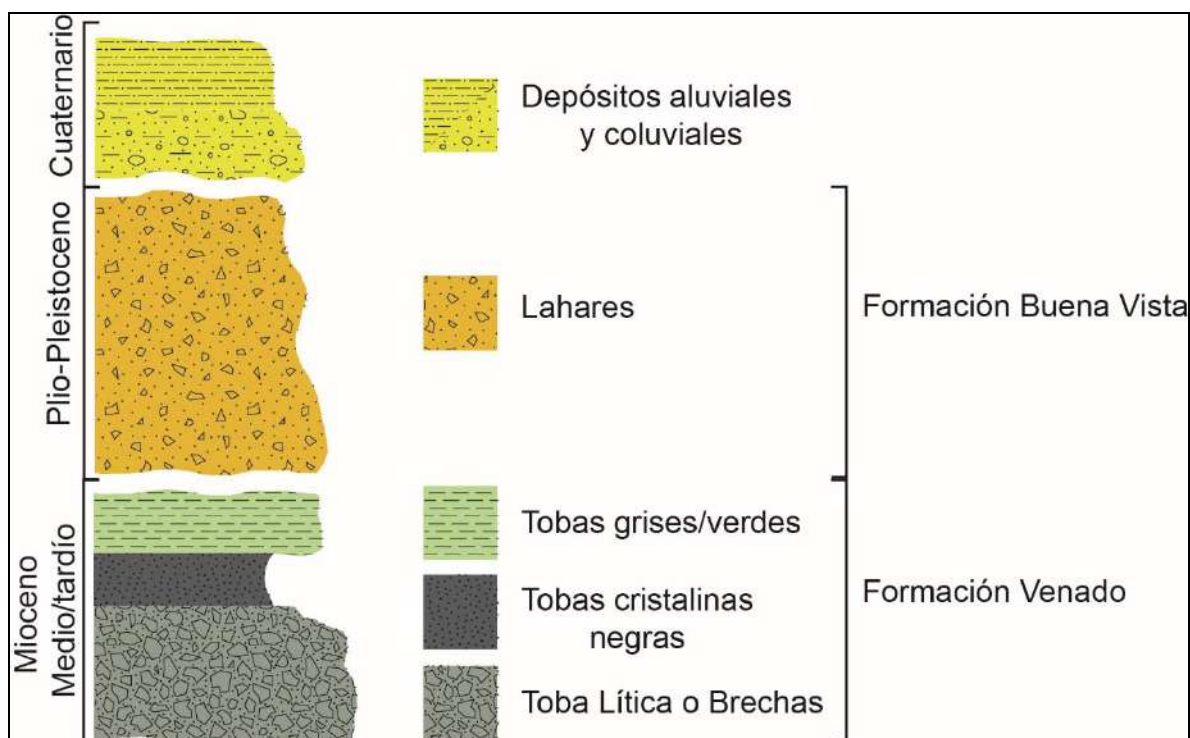


En el perfil geológico de la figura 16, se aprecia que en la unidad de brechas y tobas se encuentra en la base de la secuencia litoestratigráfica, esta unidad aflora en la parte alta sur del área de estudio y en los cañones de ríos, con un espesor mínimo estimado de 100 m. Sobreyaciendo la unidad de brechas y tobas se encuentran los depósitos de tobas polimícticas, los cuales se asocian al relieve plano en la zona media del área de estudio con espesores estimados entre los 50 m y 80 m, según la información de los pozos indicados en el perfil (Figura 16). En la parte alta también se encuentra esta unidad pero su espesor es menor, alrededor de los 20 m. En la cima de la secuencia, se encuentran los depósitos de tobas arcillosas, con espesores entre 15 m y 35 m aproximadamente. Esta unidad se asocia a las pendientes bajas ubicadas en el sector norte del área de estudio y en el cauce del río Pocosal.

Comparando el perfil con la columna estratigráfica local de la figura 17, se determina que la secuencia inicia con la formación Venado a la cual se le atribuye la unidad de brechas y tobas, la cual es sobreyacida por la formación Buena Vista a la cual es representada localmente por las unidades de tobas polimícticas y tobas arcillosas. Por último, se tienen los depósitos aluviales y coluviales en la parte superior.



**Figura 16.** Perfil geológico del margen este del área de estudio, con dirección noroeste.



**Figura 17.** Columna estratigráfica adaptada para la zona de estudio.

#### 4.2.1 Unidad de Brechas y tobas

La unidad aflora en la parte alta del área de estudio, localizada en el extremo sur; más específicamente por la localidad de Juanilama, en el distrito de Pocosol. Esta unidad cubre aproximadamente un 17,10% del total del área de estudio, que corresponde con 38,8 km<sup>2</sup>. El afloramiento pertenece a un salto sobre el río Pocosol, cerca de la quebrada Chambacú; el salto tiene una altura de 7 m y una longitud de 20 m.

La secuencia se compone de tobas con granulometría de arena de color café hasta gris oscuro, las cuales se encuentran alteradas con óxidos de hierro y manganeso. Son de grano medio a grueso. No presentan estructura interna y se encuentran mal cementadas. También se encuentran lutitas de color gris a verde.

Macroscópicamente corresponde con brechas o tobas líticas, están compuestas por bloques centimétricos a métricos de composición andesítica en una matriz arenosa. La cementación es buena y la consistencia de la roca es dura, el afloramiento se encuentra

en el parque Juanilama donde hay un salto de máximo 7 m de altura y 20 metros de ancho (Figura 18).

Esta unidad se clasifica microscópicamente como toba lítica con clastos de andesita pómez, y fenocristales de plagioclasas, augita y opacos, en una matriz hialino cristalina con plagioclasas, augita y opacos. Los bloques de lava que se encuentran incluidos en la matriz de los depósitos piroclásticos, son andesítico basálticos. Los cuales están compuesto por plagioclasas (26%), olivinos (5%), augita (8%), calcita (4%), opacos (3%) principalmente pirita y magnetita; se clasifica como andesita basáltica porfirítica con augita y olivino y presenta alteración a carbonatos.



**Figura 18.** Afloramiento en la localidad de Juanilama en el distrito de Pocosol, se observa el salto (izquierda) y la muestra de mano de la brecha encontrada en el sitio (derecha) (Coordenadas CRTM-05: 438 769 E, 1178968 N).

En la misma unidad se encuentran depósitos piroclásticos asociados, la secuencia más sana aflora en un cerro al sureste de la localidad de Lirios. Corresponde con un cerro al lado de la carretera con 20 m de altura y al menos 100 metros de ancho; el afloramiento se observó localmente donde se observó una secuencia de 5 m de alto por 10 m de ancho.

La secuencia inicia con un nivel de 80 cm de una toba de ceniza gruesa de color negro poco consolidadas; seguidas por un depósito de 2 m de espesor de tobas de ceniza fina a media consolidada y de consistencia medio dura de color café claro con óxidos de hierro y manganeso. Sobreyaciendo la secuencia se encuentra un depósito de bloques

centimétricos polimícticos, principalmente lavas andesíticas y tobas de color café y gris, insertados en una matriz areno limosa de color café, este depósito se encuentra consolidado y con una dureza media; además presenta lentes métricos de toba arcillosa plástica de color gris claro a blanco (Figura 19).

Microscópicamente, la toba de ceniza gruesa de color negro, está compuesta por 70% de fenocristales y 30% de matriz. Los fenocristales comprenden 2% de magnetita xenomórfica, 2% de pirita hipidiomórfica, 5% de augita en cristales xenomórficos, 20% de cristales hipidiomórficos de plagioclasa y 40% de clastos líticos. La matriz es hialina con fenocristales de plagioclasa, opacos y augita. La clasificación es toba cristalina andesítica con cristales de plagioclasa y augita con matriz hialina.

Microscópicamente presenta una textura clástica con fenocristales hipidiomórficos de plagioclasa (10%), cristales xenomórficos de augita (10%), cristales xenomórficos de opacos (10%), hornblenda basáltica hipidiomórfica (5%), y menos de 1% de olivino alterado a óxidos de hierro. Por lo tanto, se clasifica como una toba cristalina basáltica con fenocristales de plagioclasa, augita y hornblenda basáltica.



**Figura 19.** Muestra de las tobas del afloramiento en las cercanías de Lirios, la toba de ceniza gruesa (izquierda) y la toba de ceniza media (derecha). (Coordenadas: 438206 E, 1187829 N).

Esta unidad está compuesta por brechas o tobas líticas y tobas cristalinas, se asocian a la secuencia vulcanoclástica asociada a la formación Venado (Mioceno Medio).

#### 4.2.2 Unidad Tobas polimícticas (Lahares)

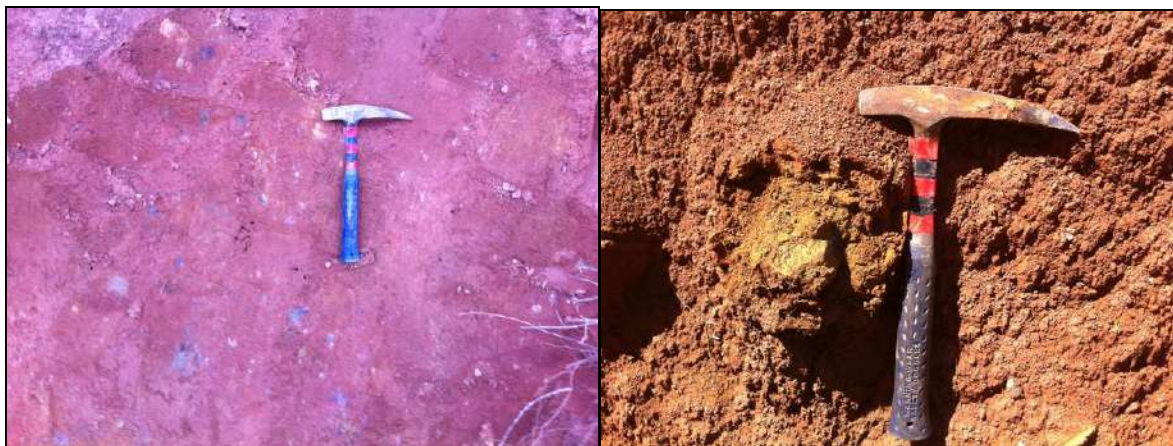
Esta unidad aflora en las localidades de Pavón, Montealegre, y Santa Cecilia en el distrito del Amparo y Cristo Rey en el distrito de Los Chiles. Esta unidad cubre aproximadamente un 25,43% del total del área de estudio, que corresponde con 57 km<sup>2</sup>.

En esta zona del área de estudio, el relieve es muy suave, por lo que los afloramientos se observan en cortes de carretera y en algunos valles de río, aunque por la topografía los ríos con valle profundo no son comunes.

Macroscópicamente se describe como una toba polimíctica, compuesta por clastos centimétricos de lava y toba con una densidad cercana al 30% del volumen total de la roca, en una matriz limo arcilloso poco consolidado de color café con tonos naranjas que ocupa un 70% del volumen total de la roca. Presenta alteración a óxidos de hierro y manganeso. Se asocia al suelo color rojizo arcilloso que se encuentra en la zona.

Microscópicamente se analizaron los bloques que conforman la roca, y se obtuvo que los clastos líticos son de composición andesítica y andesitas basálticas porfirítica con augita y alteración a óxidos de hierro y a carbonatos. Los bloques tienen textura hipocristalina porfirítica con fenocristales hipidiomórficos a xenomórficos de plagioclasa (24%), cristales de augita xenomórficos (7%) alterados a arcillas y clorita azul, cristales hipidiomórficos de pirita (2%), olivinos xenomórficos alterados a calcita y arcillas (2%); la matriz tiene una textura hialopilitica compuesta por fenocristales de plagioclasa, augita y opacos; la matriz ocupa un 65% del total de la roca.





**Figura 20.** Depósito de tobas líticas (izquierda) y depósito de tobas con un clasto de andesita 15 cm de diámetro aproximadamente (Derecha) (Coordenadas CRTM-05: 437234 E, 1200769 N).

Esta unidad se asocia con los depósitos que se encuentran sobreyaciendo la formación Venado, los cuales corresponden con depósitos continentales y paleolacustres del Holoceno. Se relacionan a depósitos de Lahar, el cual se divide en fracción fina hacia el norte y fracción gruesa hacia el sur; clasificándose por el tamaño de los bloques. En la zona de estudio se encuentra lo que se interpreta como la fracción media a fina y la fracción fina, ya que son predominantemente arcillas y arcillas arenosas con bloques centimétricos a métricos de lava, pero la frecuencia de los bloques lávicos es baja (10% a 15%).

#### 4.2.3 Unidad de tobas arcillosas (Lahares).

Esta unidad aflora en el sector norte del área de estudio, por las localidades de La Virgen y Finca El Corozo. Esta unidad cubre aproximadamente un 57,5% del total del área de estudio, que corresponde con 128,3 km<sup>2</sup>.

Esta unidad se caracteriza por una expresión geomorfológica suave, donde las pendientes son subhorizontales a horizontales. Por lo tanto los afloramientos son difíciles de encontrar, ya que los ríos no tiene valles pronunciados ni tampoco hay serranías. Los afloramientos se aprecian en los cortes de carretera donde se observan afloramientos de 50 m de ancho y 5 m de alto; y en el río Landeros también se observan afloramientos de la litología del sitio, en el cauce del río.

El material geológico se describe macroscópicamente como un depósito limo arenoso de color rojo con machas de color blanco y gris que se asocian a la alteración hidrotermal, inmersos en la matriz se encuentran bloques centimétricos subangulares con un diámetro máximo de 40 cm, presentes en un 5%. Los bloques presentan alteración tipo capas de cebolla con pátinas de color naranja (óxidos de Fe) y pátinas de color negro (Óxidos de Mn). La roca sana se encuentra en los núcleos de los bloques, y es de color gris azulado, con textura afanítica porfirítica, con un 10% de ferromagnesianos y 20% de plagioclasas.

A la matriz se le realizó un análisis textural y de densidad y porosidad por ser el material principal en esta unidad, obteniendo que texturalmente la matriz es arcillosa compuesta por 13-20% de arena y de 10-12% de limos. Por lo tanto se trata de una arcilla arenosa con limo. Presenta una densidad aparente de  $1,02 \text{ g/cm}^3$  y una densidad de partícula de  $2,6 \text{ g/cm}^3$  y una porosidad de 59%-62%.

Microscópicamente, los bloques inmersos en la matriz arcillosa, se clasifican como andesita porfirítica con plagioclasa y augita, y alteración a óxidos de hierro. La roca presenta una textura afanítica porfirítica con fenocristales hipidiomórficos de plagioclasa (30%), cristales xenomórficos de augita (12%), pirita xenomórfica (4%), vesículas (4%) y cristales hipidiomórficos de hipersteno (1%), la matriz compone un 49% de la roca y presenta textura hialopilitica con fenocristales de plagioclasa, augita y opacos.



**Figura 21.** Afloramiento de la unidad tobas arcillosas (Izquierda) y muestra de mano con textura típica de los afloramientos donde se aprecian machas blancas y grises (textura tigrillo) en el material rojizo (derecha) (Coordenadas CRTM-05: 429428 E, 1205504 N).



Estos depósitos se componen de material arcilloso de gran espesor, con alto contenido de materiales volcánicos (líticos de lava y toba) que se asocian a la formación Buenavista (Plioceno-Cuaternario), los cuales cubren grandes áreas, especialmente en la región norte de la zona de estudio donde el relieve es muy plano. Malavassi & Madrigal (1970) dividieron esta formación en lahar fino y grueso. En la zona los depósitos tienen bloques angulares y subangulares que varía de tamaños centimétricos hasta métricos pero la fracción fina de arcillas arenosas ricas en óxidos de hierro es predominante, las vetas de óxidos de manganeso son comunes. No presentan estructura interna evidente ni selección de los clastos, sin embargo, algunos afloramientos presentan estratificación paralela plana; como en el norte de Cristo Rey en las coordenadas CRTM-05 437 531 E, 1206582 N.

El suelo en la cuenca se clasifica como inceptisol en el sector norte, y en el sector este, oeste y sur se clasifican como ultisoles (Rojas *et al.* , 2011). Estos suelos son rojos arcillosos, siendo caolinita la arcilla más común; el color rojo se debe a los óxidos de hierro. Se definen como suelos minerales producto de la meteorización de rocas y ocurren en zonas tropicales húmedas. Tienden a ser ácidos con pH iguales o menores a 5 (Rojas *et al.* , 2011).

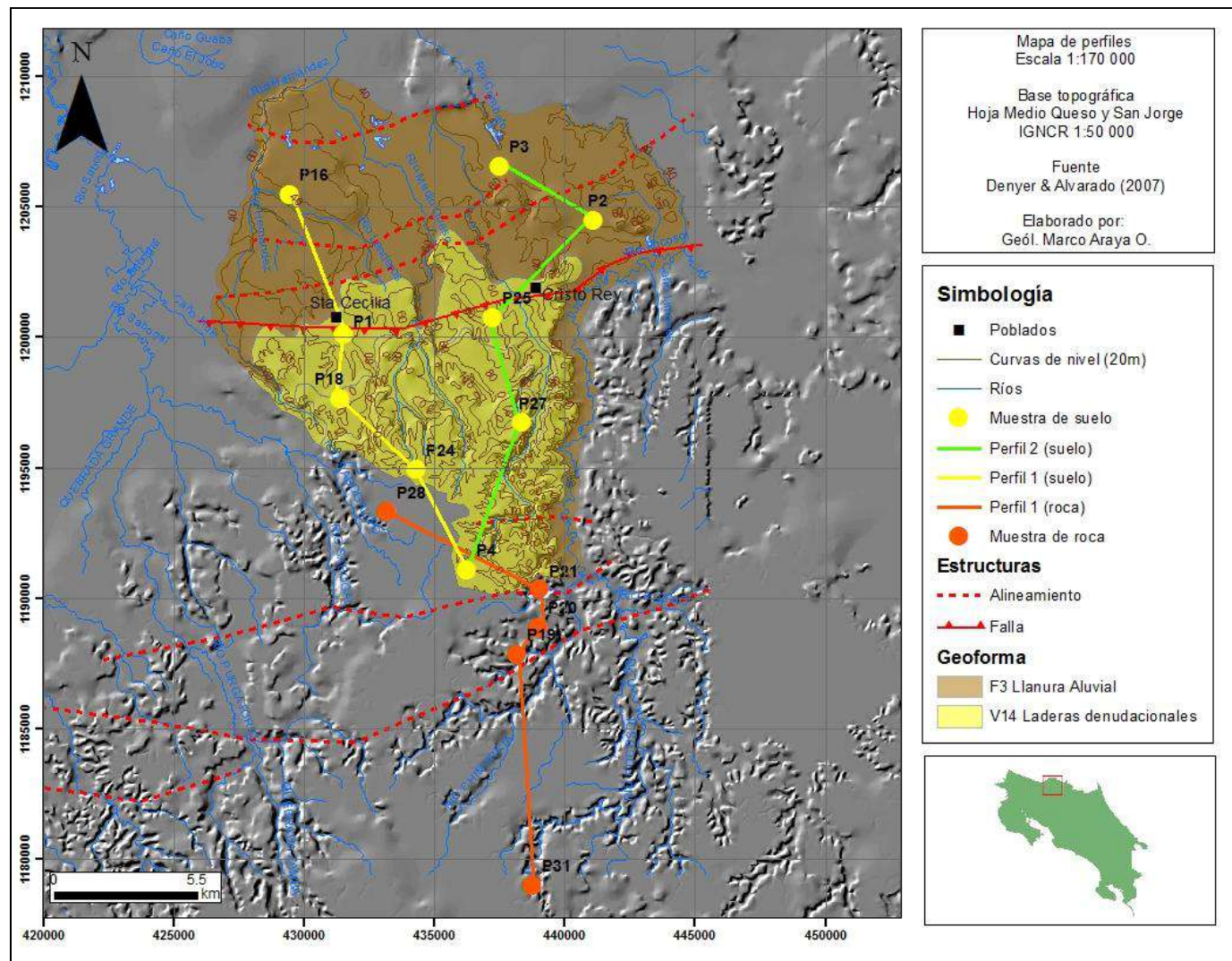
### **4.3 Geoquímica**

Se realizaron análisis de difracción de rayos X, en cinco (5) muestras de roca seleccionadas debido a que son las litologías predominantes en la zona de estudio. Con estos datos se detectaron los siguientes minerales: andesina (compuesto por aluminio, calcio, sodio y sílice), aluminosilicatos (compuestos por aluminio, sílice, oxígeno, calcio y sodio), específicamente se encuentra caolinita. También se determina la presencia de silicatos de manganeso (kanoite) compuesto por sílice, oxígeno y manganeso. Además, se encuentra lindackerita, el cual es un mineral compuesto cobre y especies de arsénico, hidratado, por lo que se considera que estos minerales serían la principal fuente del arsénico en disolución.

Otros minerales importantes son los nesosilicatos u ortosilicatos, dentro de los cuales se incluyen la fayalita y la forsterita; también los hidróxidos de silicatos de aluminio, magnesio, hierro, potasio.

La composición elemental de las rocas analizadas indica que todas las muestras están compuestas por 0,10% a 0,20% de manganeso y alrededor de 4,86% y 6,76% de hierro por lo que esto indica que la fuente del hierro y manganeso en el agua subterránea son de origen geológico. Por su parte las muestras de suelo, indican una concentración de arsénico entre 2,61 g/kg hasta 9,70 g/kg, esto se interpreta como que el arsénico es producto de la alteración de los materiales geológicos de la zona y por lo tanto su concentración es mayor en los suelos que en las rocas. Como se refleja en los análisis de difracción de rayos X en las muestras de roca, en las brechas y tobas líticas se encuentran minerales con arsénico como componente principal, por lo que es esta unidad la principal fuente, y debido a la alteración y meteorización el arsénico se concentra posteriormente en los suelos residuales de la zona.

Los perfiles trazados a lo largo de la zona de estudio (Figura 22) como se indica en el apartado de geoquímica, hay evidencia de anomalías en el área de estudio que pueden indicar movilidad del arsénico. El perfil de muestras de roca se ubica al sur del área de estudio en la zona con la unidad geológica de brechas y tobas líticas, que coincide con la unidad geomorfológica de laderas denudacionales; se observa como los componentes elementales presentan variaciones importantes en sus concentraciones alrededor del punto de la muestra 20 y 21, alrededores de la localidad de San Jorge. Por ejemplo, se encuentra un comportamiento cóncavo hacia arriba en la concentración de hierro, zinc, cobre, y un comportamiento cóncavo hacia abajo en las concentraciones de potasio, calcio, titanio, y manganeso. Las concentraciones de estroncio también decrecen en este punto. Mientras que el zircón y el rubidio presentan un aumento en sus concentraciones. Estas anomalías en las concentraciones se pueden deber a un cambio litológico, sin embargo, en las secciones petrográficas realizadas se comprueba que las composiciones mineralógicas son muy similares y lo mismo se comprueba con los ensayos de refracción de rayos X por lo que se determina que la anomalía es producto de posibles lineamientos tectónicos que se trazan en el mapa geomorfológico. Estas posibles zonas de fractura se asocian a zonas de alteración que favorecerían la movilidad de algunos componentes elementales de la roca.



**Figura 22.** Ubicación espacial de los puntos de muestreo de roca y suelo.

En los análisis realizados en las muestras de suelo, descritos en las secciones 4.3.1 a 4.3.5, se evidencia una anomalía importante; se observa que en el perfil 1, en las muestras P18 y P1 hay un descenso en la concentración de arsénico y posteriormente un aumento en el mismo. Este comportamiento es igual en el perfil 2, donde las muestras P27 y P25 presentan menores concentraciones de arsénico en estos puntos. En ambos perfiles estas concentraciones coinciden con una franja del área de estudio que se encuentra en las localidades de Cristo Rey y Santa Cecilia; en estas localidades fue evidenciada una alteración en los valores de resistividad eléctrica de los perfiles realizados, que se asocian a una falla. Esta falla es trazada por otros autores como Denyer & Alvarado (2007) y con los resultados de la geofísica se clasifica como una falla inferida a la cual se asocian los cambios de concentraciones en el arsénico en los suelos. Esta disminución en las concentraciones puede deberse a la alteración y a la presencia de fracturas en esta zona lo que favorece la disolución de los minerales con arsénico y por lo tanto aumenta la movilidad del mismo hacia las aguas subterráneas. Esto se sustenta en el hecho que en esta zona se presentan las concentraciones máximas en arsénico, manganeso y hierro en el agua subterránea, es por esta razón que el AYA tiene plantas de remoción de dichos elementos en las captaciones en Cristo Rey y Santa Cecilia.

Tal y como se indicó en la sección 1.6, se realizó análisis de difracción de rayos X de varias muestras de roca, para conocer la composición mineralógica de 5 muestras, la distribución espacial se muestra en la figura 22. Tal y como se muestra en la figura, se recolectaron muestras de las distintas litologías aflorantes en la zona, basándose en un muestreo al azar estratificado, donde se tomaron muestras de suelo y roca al azar dentro de una misma formación geológica, en intervalos a lo largo de una línea y se construyeron varios perfiles para analizar los cambios en las concentraciones de las rocas.

Las muestras de suelos fueron tomadas en superficie.

#### 4.3.1 Muestra P19

Elementalmente la muestra P19 está compuesta por 0,24% (2400 mg/kg) de K, 2,90% de calcio, 0,65% (65000 mg/kg) de Ti, 0,11% (1100 mg/kg) de Mn, 6,50% (65000 mg/kg) de Fe, 48 mgCu/kg, 110 mg Zn/kg, 27 mg Rb/kg, 471 mg Sr/Kg, 43 mgZr/kg, este análisis se realizó por espectrometría de fluorescencia de rayos X dispersiva en energía.

La muestra P19 ubicada en las coordenadas CRTM-05 1187833 Norte y 438224 Este, presenta dentro de los componentes la andesina que es un silicato miembro de la serie de entre feldespatos y plagioclasas. Compuesta por aluminio, calcio, sodio y sílice  $((Ca, Na)(Al, Si)_4O_8)$ . Aluminosilicatos con sodio y calcio y aluminio silicatos con calcio y sodio; los principales componentes son: Aluminio, sílice y oxígeno con calcio y sodio en menor proporción. Son los principales componentes de la kaolinita y otros minerales de arcilla, los cuales tiene la fórmula  $Al_2SiO_5$ . La kanoite es un silicato de manganeso y magnesio con la fórmula  $(Mn^{2+}, Mg)_2 Si_2O_6$ . Donde los componentes de mayor proporción son el oxígeno, manganeso, sílice y magnesio de mayor a menor. Lindackerita es otro mineral registrado en la muestra P19, cuya fórmula es  $Cu_4(AsO_4)_2(HAsO_4)_2 \cdot 9H_2O$  siendo el componente mayoritario el oxígeno, cobre arsénico e hidrógeno. En forma de óxidos el componente mayoritario es el  $As_2O_5$ ,  $CuO$  y  $H_2O$ .

#### 4.3.2 Muestra P20

Elementalmente la muestra P20 está compuesta por 1,10% (11000 mg/kg) de K, 4,21% (42000 mg/kg) de calcio, 0,56% (5600 mg/kg) de Ti, 0,12% de Mn, 5,30% (53000 mg/kg) de Fe, 35 mg Cu/kg, 99 mg Zn/kg, 34 mg Rb/kg, 689 mg Sr/Kg, 128 mg Zr/kg.

La muestra P20 ubicada en las coordenadas CRTM-05 1188876 Norte y 439002 Este; igual que la muestra anterior contiene andesina, silicato de hierro con calcio y magnesio el cuales un nesosilicato asociado al grupo del olivino. La fórmula es  $Fe_2SiO_4$ , con hierro se conoce como Fayalita o con magnesio es forsterita  $Mg_2SiO_4$ . Además, también se registró anortita  $(CaAl_2Si_2O_8)$  el cual es un silicato del grupo de los feldespatos.

#### 4.3.3 Muestra P21

Elementalmente la muestra P21 está compuesta por 0,18% (1800 mg/kg) de K, 0,15% (1500 mg/kg) de calcio, 0,49% (4900 mg/kg) de Ti, 0,10% (1000 mg/k) de Mn, 6,76% (67600 mg/kg) de Fe, 56 mgCu/kg, 130 mg Zn/kg, 45 mg Rb/kg, 92 mg Sr/Kg, 157 mgZr/kg.

La muestra P21 ubicada en las coordenadas 1187834 Norte y 438217 Este, hidróxido de aluminosilicato hidratado  $(Al_2Si_2O_5(OH)_4 \cdot 2H_2O)$ , óxidos de sílice  $SiO_2$ , hidróxidos de

silicatos de magnesio  $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5 (\text{OH})_4$ , Hidróxidos hidratados de silicatos de aluminio, magnesio y sodio  $\text{Na} (\text{Al,Mg})_2 \text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot 8 \text{H}_2\text{O}$ . Hidróxido de silicato de magnesio aluminio, hierro, sodio y potasio  $(\text{K,Na})(\text{Fe, Al, Mg})_2 (\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2$ .

#### 4.3.4 Muestra P28

Elementalmente la muestra P28 está compuesta por 0,96% (9600 mg/kg) de K, 4,58% (45800 mg/kg) de calcio, 0,52% (5200 mg/kg) de Ti, 0,20% (2000 mg/kg) de Mn, 4,86% (48600 mg/kg) de Fe, 31 mgCu/kg, 92 mg Zn/kg, 32 mg Rb/kg, 654 mg Sr/Kg, 105 mgZr/kg.

La muestra P28 ubicada en las coordenadas 1193292 Norte y 433204 Este, uno de sus componentes es augita, este mineral contiene aluminio, calcio, hierro, magnesio, manganeso, sodio, sílice y titanio). Aluminosilicato de calcio y sodio, son los principales componentes de la kaolinita y otros minerales de arcilla, los cuales tiene la formula  $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ . Silice ( $\text{SiO}_2$ ), hidróxidos de aluminio ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ).

#### 4.3.5 Muestra P31

Elementalmente la muestra P31 está compuesta por 0,51% (5100 mg/kg) de K, 2,40% (24000 mg/kg) de calcio, 0,55% (5500 mg/kg) de Ti, 0,16% (1600 mg/kg) de Mn, 5,74% (57400 mg/kg) de Fe, 46 mgCu/kg, 104 mg Zn/kg, 28 mg Rb/kg, 622 mg Sr/Kg, 141 mgZr/kg.

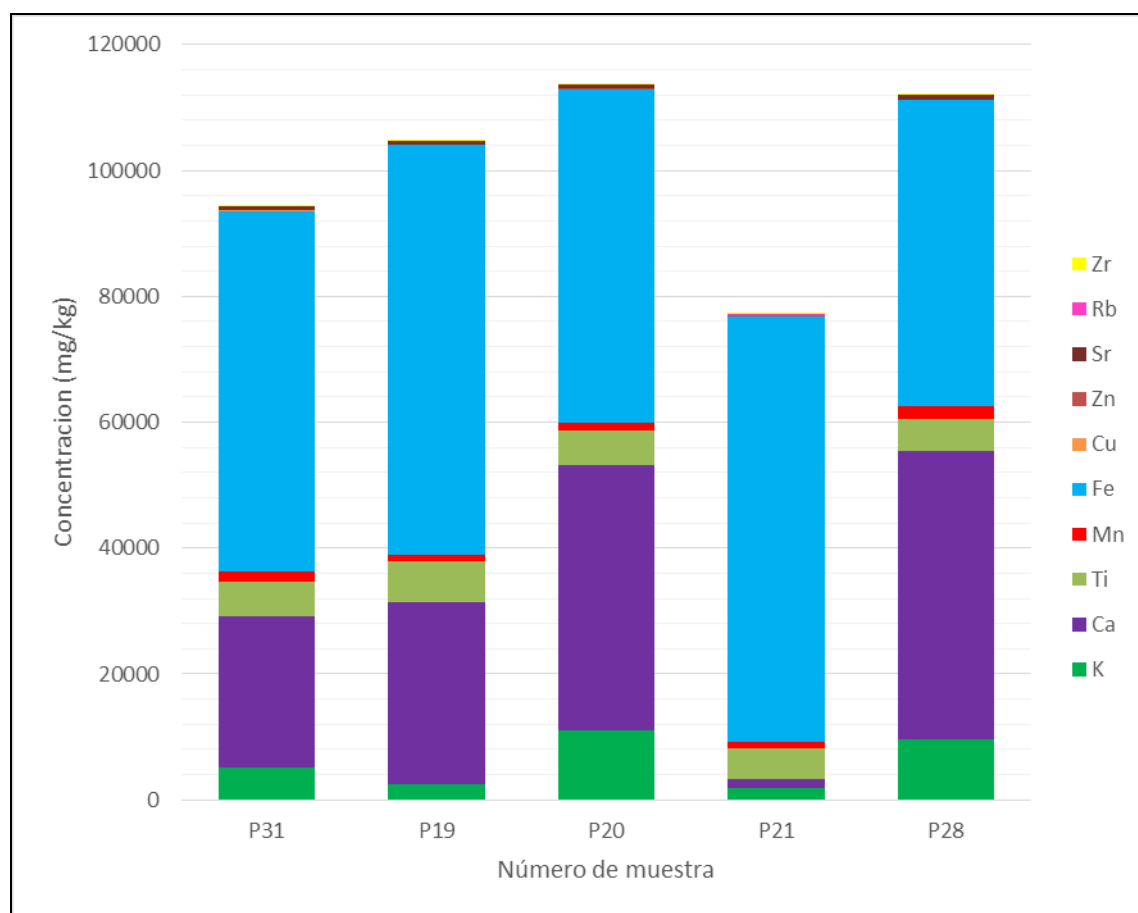
La muestra P31 ubicada en las coordenadas CRTM-05 1178965 Norte y 438 747 Este, se registró anortita sódica, silicatos de aluminio, hierro, calcio y sodio; e hidróxido hidratado de arsenato y cobre  $(\text{Cu}_5 (\text{ASO}_4)_2 (\text{AsO}_3\text{OH})_2 9\text{H}_2\text{O})$ .

En cuanto al suelo, se analizaron 9 muestras y se obtuvieron valores de As desde 2.61 a 9.70 g/kg (2610 mg/L a 9700 mg/L).

#### 4.3.6 Relación de componentes elementales

En el gráfico 1 se observa la relación de los elementos que componen las muestras recolectadas, donde se observan rocas muy similares en P31 y P19, y entre P20 y P28. En el primer grupo se observan los componentes principales Fe y Ca, K, Ti, Mn, Sr, Zr. Siendo las proporciones muy parecidas en ambas rocas. En el segundo grupo, tiene los mismos componentes principales. Entre ambos grupos la similitud en proporciones es similar excepto que el segundo tiene más Ca, K y Mn, y menos Fe que el grupo uno.

El caso de la muestra P21 es distinto ya que el Ca disminuye en un 96% en comparación con la P28. De igual forma se comporta el K. Mientras que las proporciones de Mn, Ti y Fe se mantienen similares. Esto se puede deber a que el punto se encuentra en un lineamiento (posible falla) por lo que la roca está alterada.

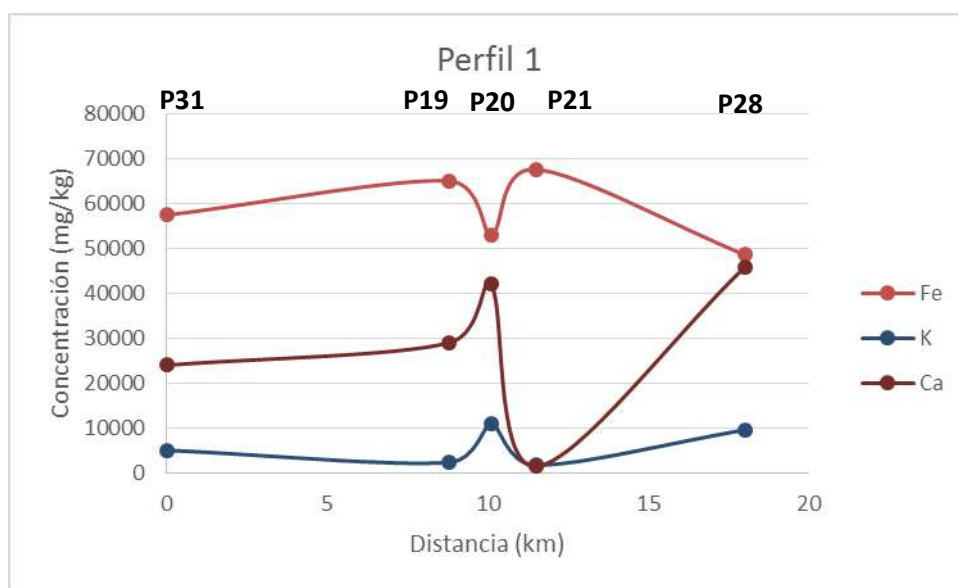


**Gráfico 1.** Relación de los componentes elementales en las muestras de roca.

En los gráficos 2, 3 y 4, se presentan la relación espacial de la composición elemental de las muestras de roca analizadas, se plantea un perfil 1 (roca) compuesto por las muestras

P31, P19, P20, P21 y 28; las cuales se encuentran en el extremo sur OESTE del área de estudio al sur de Cobano camino a San Jorge, saliendo del área de estudio.

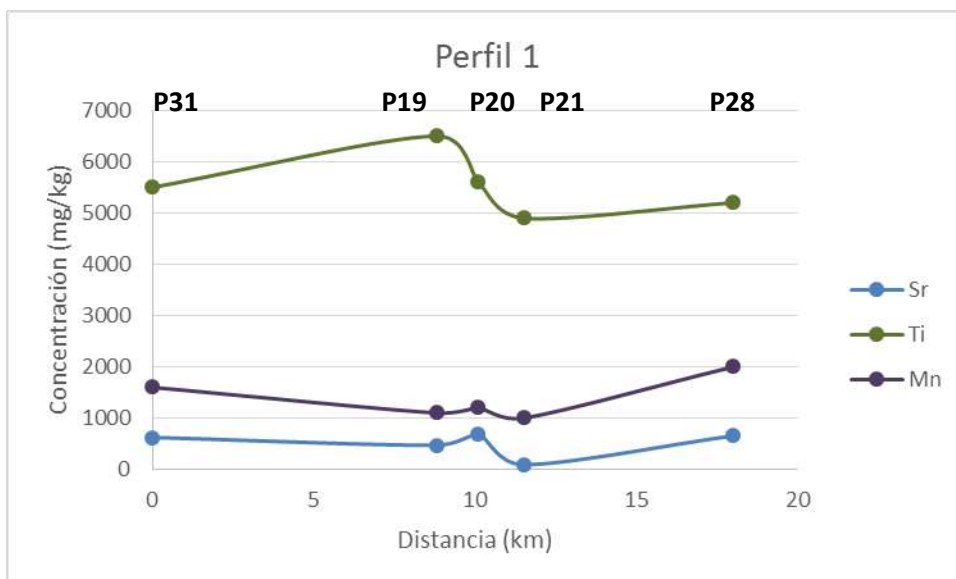
En el gráfico 2 se muestra una anomalía en las concentraciones de Fe, K y Ca entre los puntos P19, P20 y P21 (al sur de Cobano). Donde la roca presenta un decaimiento en la concentración de Fe y aumenta la concentración de Ca y de K; esto entre los puntos P19 y P20. Posteriormente se observa un aumento en la concentración de Fe, y una disminución en las concentraciones de Ca y K, entre los puntos P20 y P21. El cual se ubica en el sector sur oeste del área de estudio, esta anomalía coincide con la traza de la falla inferida en el área de estudio.



**Gráfico 2.** Relación espacial de los componentes elementales en las muestras de roca en la línea de perfil 1.

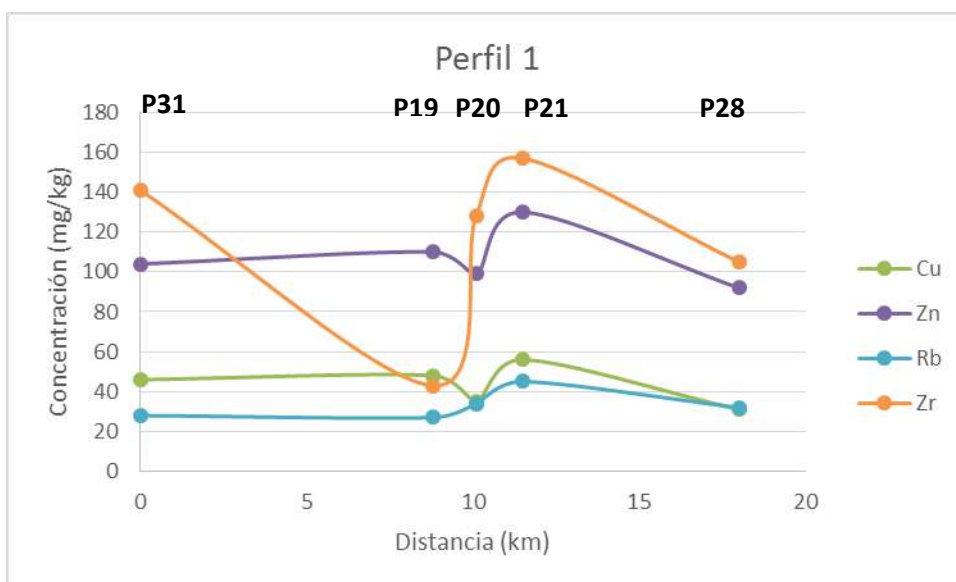
En el gráfico 3, se exhibe una anomalía con elementos como estroncio (Sr), titanio (Ti) y manganeso (Mn), entre los puntos P19, P20 y P21 se observa una disminución importante en la concentración de Ti, mientras el Sr y Mn presentan un incremento en la concentración.





**Gráfico 3.** Relación espacial de los componentes elementales en las muestras de roca en la línea de perfil 1.

En el gráfico 4, la misma anomalía se observa con otros elementos como el cobre (Cu), zinc (Zn), rubidio (Rb) y zirconio (Zr), donde en la hay una disminución de las concentraciones de Zn y Cu. En el caso del Zr y el Rb, aumenta la concentración de ambos elementos, especialmente la concentración del Zr.

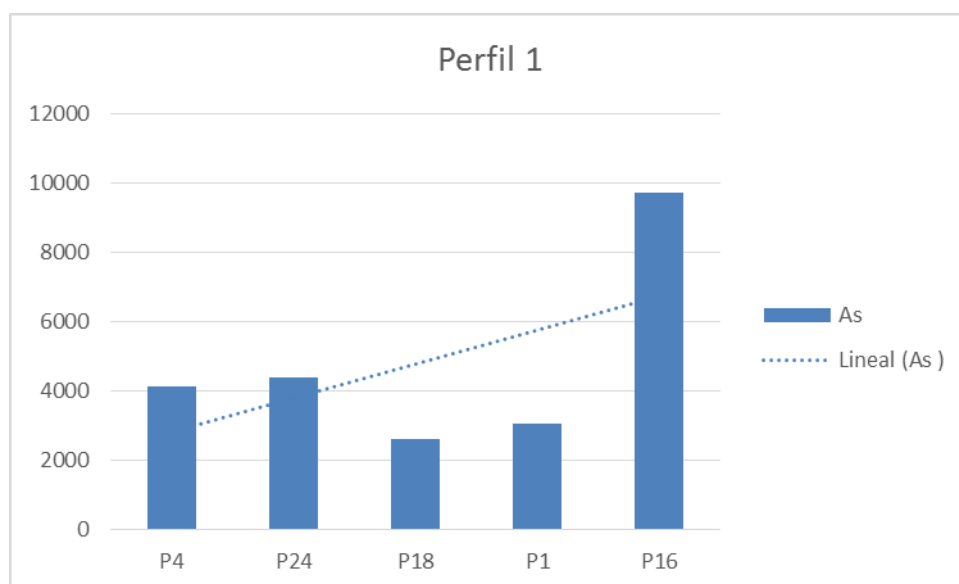


**Gráfico 4.** Relación espacial de los componentes elementales en las muestras de roca en la línea de perfil 1.

Estas anomalías que se representan en los gráficos 2, 3 y 4 se asocian a la presencia de fallas las cuales se delimitaron con ayuda de análisis geomorfológicos y coinciden con cambios en las concentraciones elementales en las muestras de roca.

El arsénico en los suelos presenta igual una anomalía correlacionada con la falla inversa que se infieren en la parte media del área de estudio cerca de las localidades de Santa Cecilia y Cristo Rey. Estas localidades a su vez son las dos que presentan mayores concentraciones de arsénico disuelto en el agua subterránea.

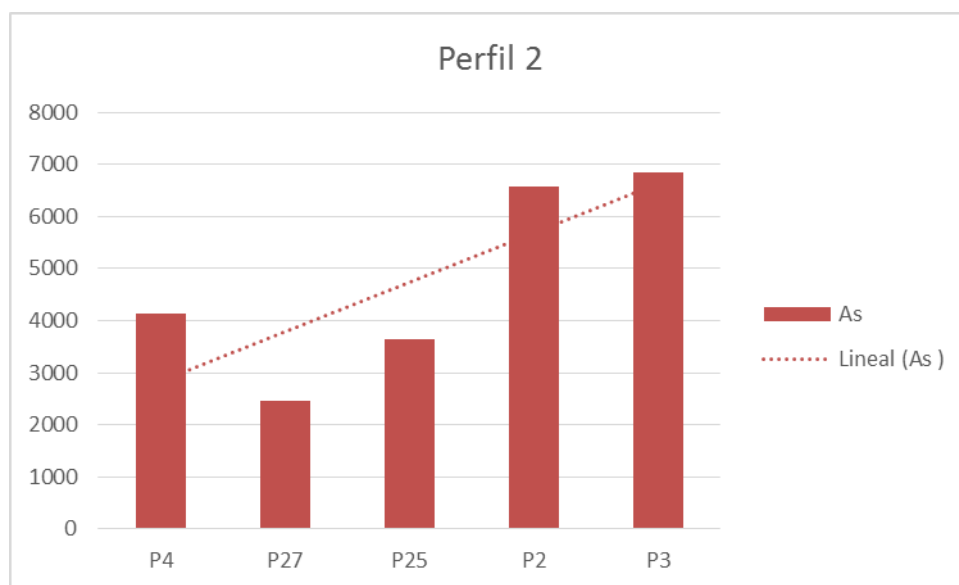
El perfil 1 (gráfico 5) se encuentra en la zona noroeste del área de estudio en las cercanías de la localidad de Santa Cecilia. Los suelos en la parte alta de la zona tienen una concentración de arsénico de 4000 mg/kg aproximadamente, disminuye antes de la localidad de Santa Cecilia y aumenta hasta los 9900 mg/kg al norte del área de estudio, posterior a la falla. Esto se puede asociar a la falla o a que en esta zona se concentran los sedimentos producto de la meteorización de rocas.



**Gráfico 5.** Relación espacial de los componentes elementales en las muestras de suelo en la línea de perfil 1.

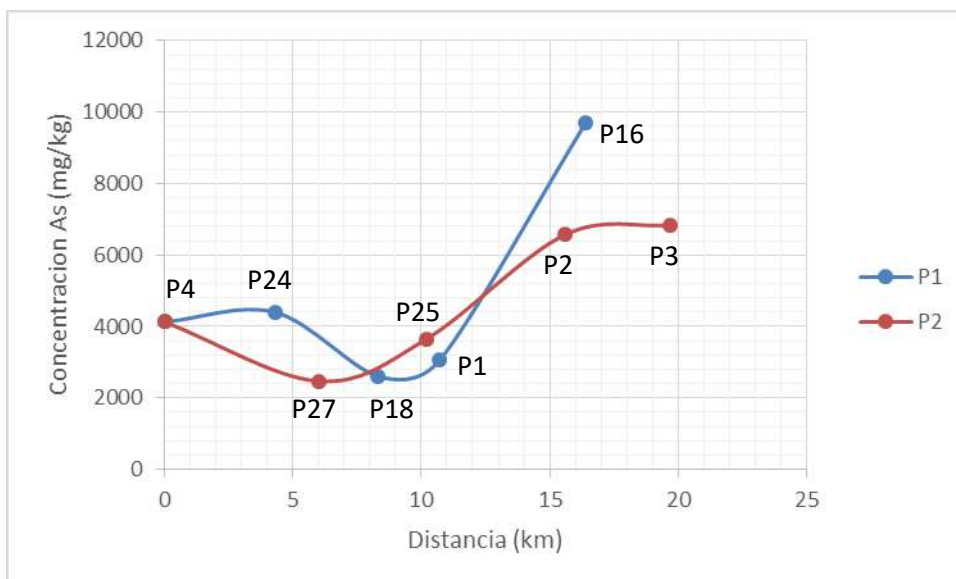
El perfil 2 (gráfico 6), se encuentra en la zona noreste de la zona de estudio en las cercanías de la localidad de Cristo Rey, en el gráfico 6 se aprecia como las concentraciones son de 4000 mg/kg, la concentración decrece entre los puntos P27 y P25

que son los más cercanos al poblado de Cristo Rey, y hacia el norte de área de estudio la concentración aumenta hasta casi alcanzar los 7000 mg/kg.



**Gráfico 6.** Relación espacial de los componentes elementales en las muestras de suelo en la línea de perfil 2.

En el gráfico 7, se observa como las concentraciones de arsénico en ambos perfiles aumentan de un valor promedio de 4130 mg/kg en la zona sur del área de estudio hasta una concentración máxima de 9700 mg/kg la cual aumenta a partir de los 5 hasta los 10 km. La traza de la falla se encuentra aproximadamente a los 10 km, se asume que la presencia de esta estructura es la responsable del aumento en las concentraciones.



**Gráfico 7.** Relaciones espaciales de los componentes elementales en las muestras de suelo y su interrelación entre el perfil 1 y el perfil 2.

#### 4.3 Exploración geofísica

En la zona de estudio se definieron cinco capas (figura 24) según los valores de resistividad eléctrica en el perfil 1 (figura 23) con dirección este-oeste, basados en la información geológica se simplificó el modelo en 3 capas, donde se incluye la unidad brechas y tobas, la unidad toba polimíctica y la unidad toba arcillosa. Como basamento se encuentra que la capa compuesta por brechas y tobas líticas, las brechas presentan valores de resistencia entre 357-1033  $\Omega\text{m}$ , y las tobas entre 17-19  $\Omega\text{m}$ . Subyaciendo se encuentran los depósitos de toba polimíctica (correspondiente con la formación lahares gruesos), a los cuales se le asigna un valor de 3,6-7,2  $\Omega\text{m}$  y por en la cima los depósitos de tobas arcillosas, lo cuales presentan valores de 20-80  $\Omega\text{m}$ .

El perfil geofísico 2 (figura 23) con dirección norte-sur, se definen seis (6) capas según la resistividad eléctrica, estas capas se interpretaron y se simplificó el modelo a un modelo de 3 unidades geológicas. Donde el basamento de igual forma corresponde con la unidad de brechas y tobas con valores que rondan los 350-900  $\Omega\text{m}$ ; sobreyaciendo se encuentra la unidad de toba polimíctica, con valores de resistividad entre 2,9  $\Omega\text{m}$  y 14  $\Omega\text{m}$ . Por último en superficie se encuentra una capa que se asocia con la unidad de toba arcillosa con valores de 115-290  $\Omega\text{m}$ . En este perfil además es evidente la alteración asociada a la

zona de fractura de la falla inferida en la zona, donde se observan valores de resistencia eléctrica inferiores, por ejemplo, de 15-44  $\Omega$ m en la unidad de brechas y tobas, donde los valores de resistencia eléctrica son superiores.

En la zona de estudio se aplicó la metodología de prospección eléctrica que se indica en la sección 1.6.6, para la cual se aplicaron sondeos eléctricos verticales (SEV) usando el arreglo electródico tipo Schlumberger. Se realizaron 10 SEV con una profundidad de penetración esperada de hasta 200 m, para una separación de electrodos AB de 350 m. La disposición de los SEV se especifica en el cuadro 4 y se ilustra en la figura 23.

**Cuadro 4.** Datos generales de los sondeos eléctricos verticales.

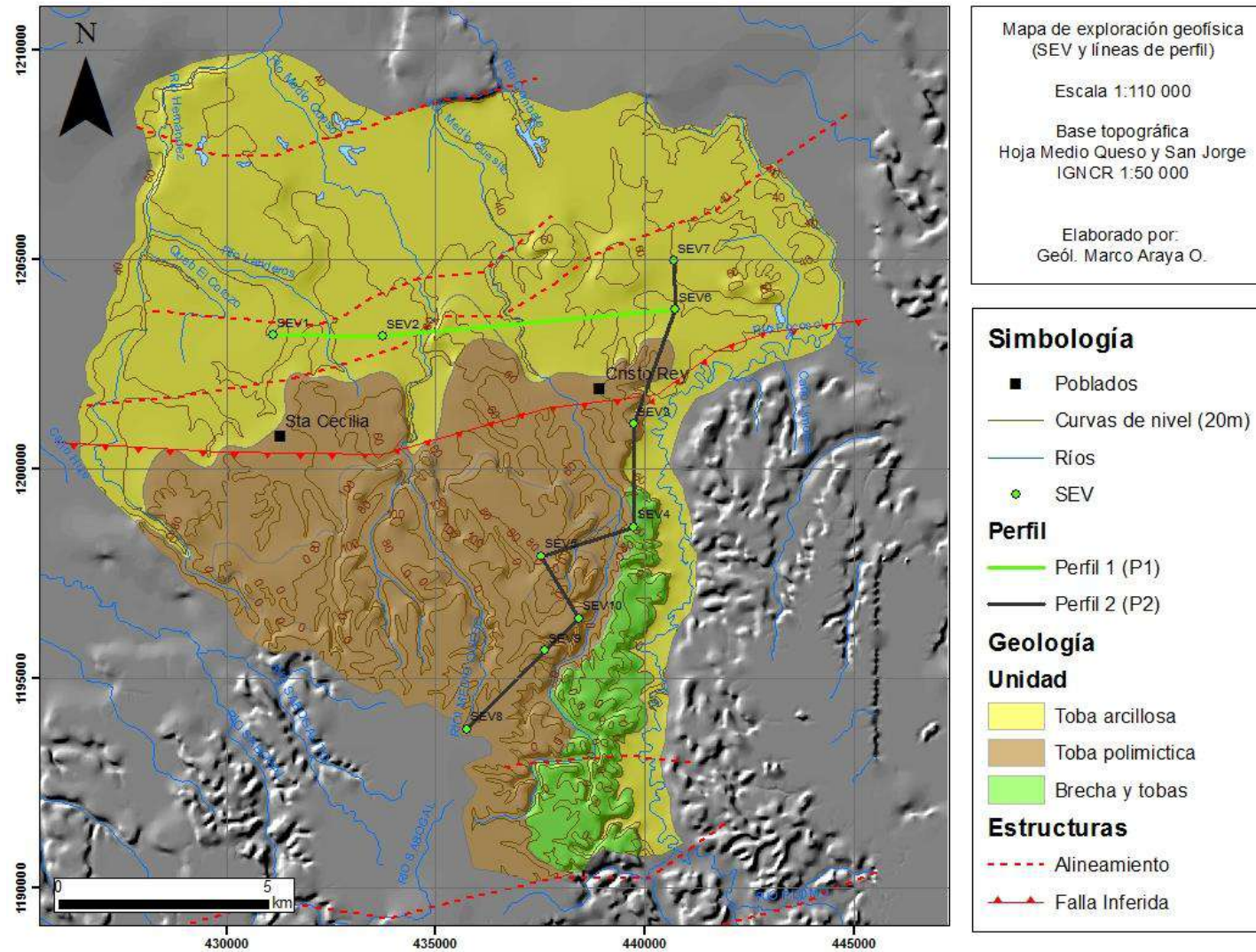
<b>SEV</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Localización</b>	<b>Método</b>	<b>Separación (m)</b>	<b>Prof. (m)</b>
<b>1</b>	431102	1203208	Carretera hacia la localidad de La Virgen.	Schlumberger	350	116.8
<b>2</b>	433743	1203173	Carretera hacia la localidad de La Virgen.	Schlumberger	350	116.8
<b>3</b>	439742	1201071	Carretera hacia la Finca Ecológica S.A.	Schlumberger	350	116.8
<b>4</b>	439740	1198612	Carretera hacia la Finca Ecológica S.A.	Schlumberger	350	116.8
<b>5</b>	437526	1197914	Carretera a la localidad de Las Nubes.	Schlumberger	350	116.8
<b>6</b>	440777	1203104	Carretera a la localidad de Las Nubes.	Schlumberger	350	116.8
<b>7</b>	437852	1203737	Carretera a la localidad de Las Nubes.	Schlumberger	350	116.8
<b>8</b>	435752	1193770	Cerca de la localidad de Los Lirios.	Schlumberger	350	116.8
<b>9</b>	437616	1195647	Cerca de la localidad de Los Lirios.	Schlumberger	350	116.8
<b>10</b>	438439	1196428	Cerca de la localidad de Los Lirios.	Schlumberger	350	116.8

Cada uno de los sondeos proporciona información puntual del subsuelo, por lo tanto al unir la información de los sondeos de forma lineal en las direcciones seleccionadas se pudieron realizar dos perfiles geoelectricos preferenciales.

Por lo tanto cada perfil geoelectrico está conformado por varios sondeos las asociaciones de sondeos para conformar cada perfil se presentan en el cuadro 5.

**Cuadro 5.** Información de perfiles geoelectricos, sondeos que los conforman y longitud.

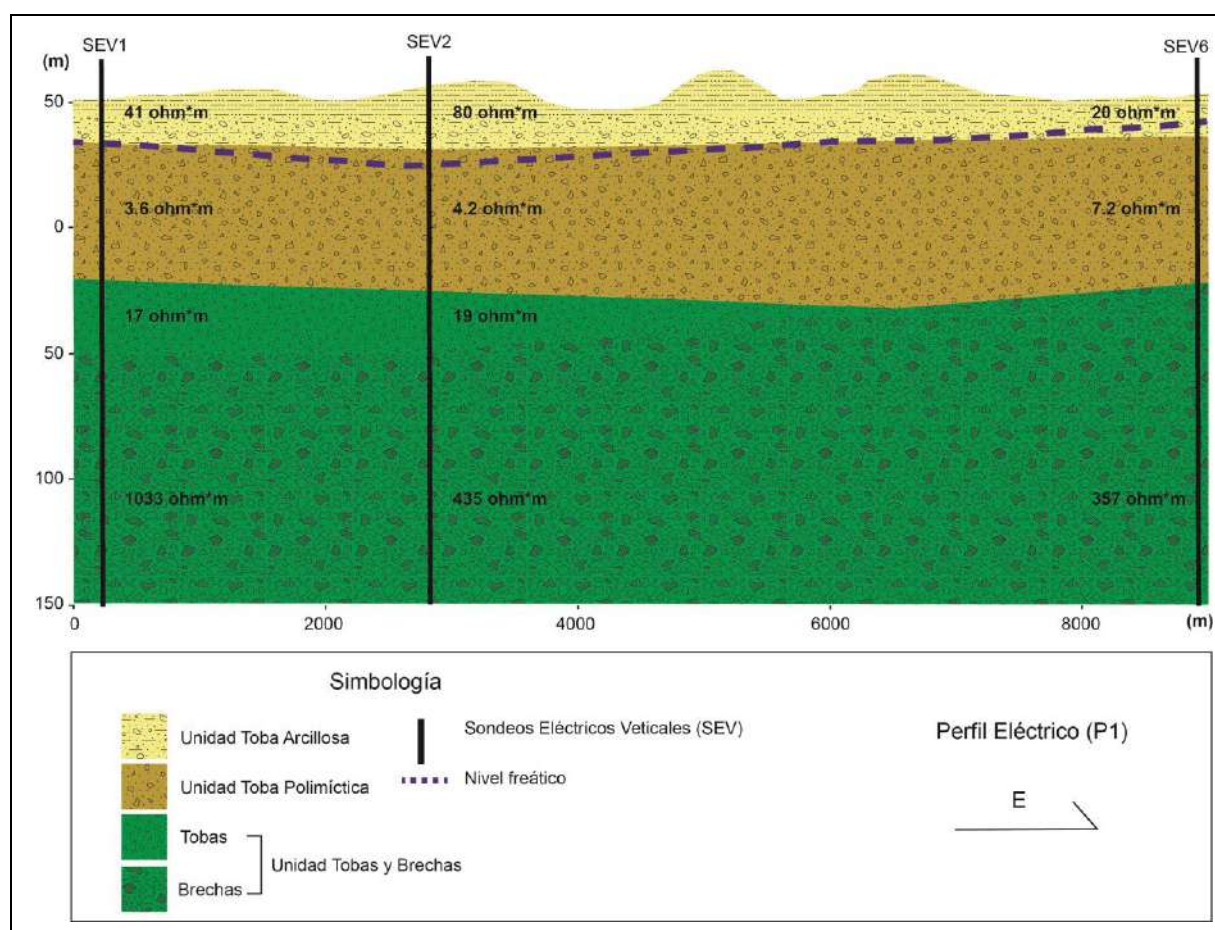
<b>Perfil</b>	<b>SEV</b>	<b>Longitud (m)</b>
<b>P1</b>	1,2,6	2640
<b>P2</b>	8,9,10,3,4,5,6,7	12900



**Figura 23.** Ubicación de los sondeos eléctricos verticales y perfiles eléctricos en el área de estudio.



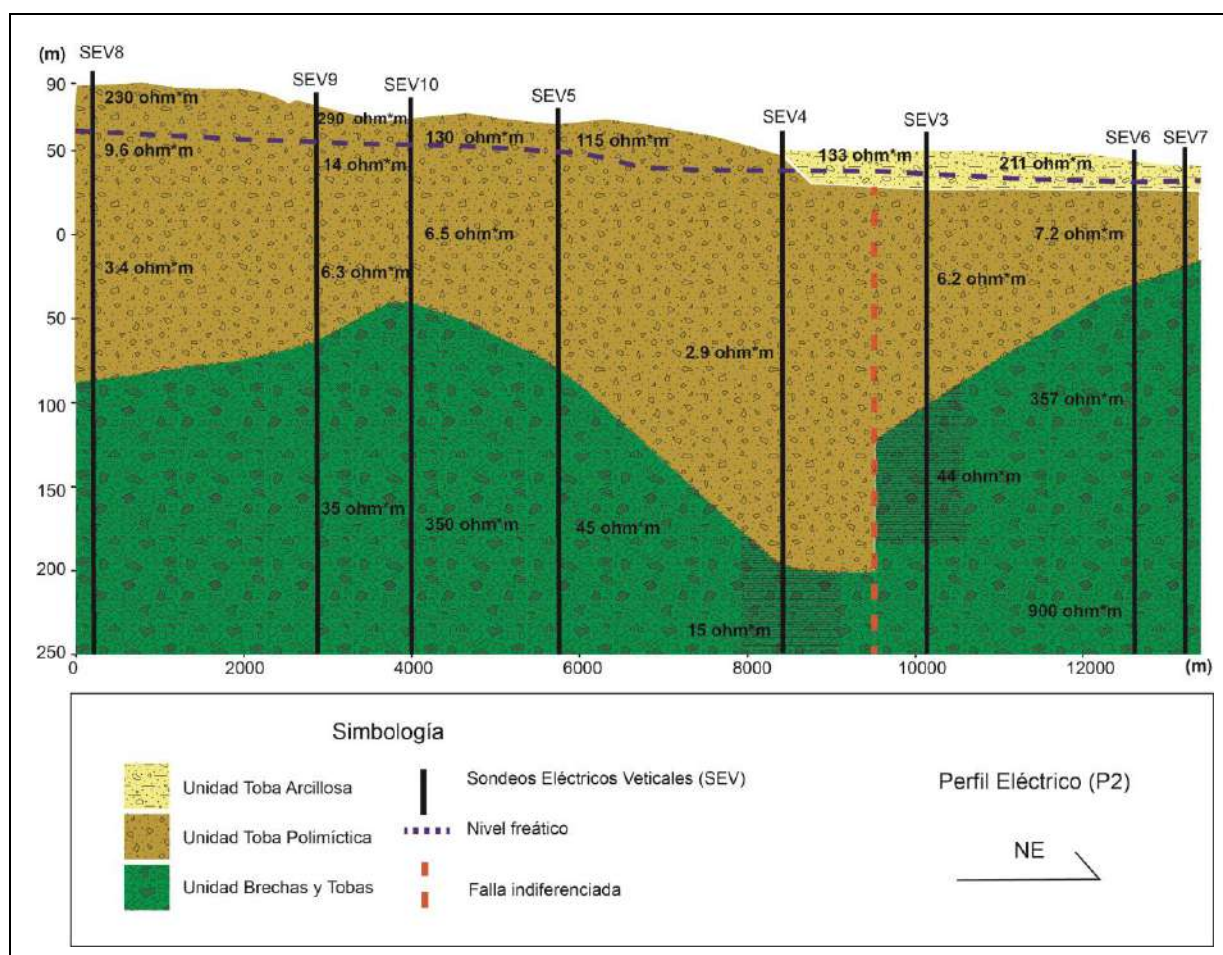
Con los datos obtenidos se construye un modelo básico de 5 capas para el perfil 1 (P1) en la figura 23, el cual corresponde con una secuencia de depósitos tobáceos y se simplifica en una secuencia de 3 capas debido a la similitud de valores entre algunas capas. Desde la base de la secuencia primero se encuentra el basamento de brechas con resistividades de 357  $\Omega\text{m}$  a 1000  $\Omega\text{m}$ ; sobreyacido por piroclastos indiferenciados con resistividades de 17-19  $\Omega\text{m}$ ; seguido por piroclastos arcillosos con valores de resistividad de 2,9  $\Omega\text{m}$  a 7,2  $\Omega\text{m}$ ; sobreyaciendo se encuentran piroclastos o epiclastos brechosos con resistividades entre 20-450  $\Omega\text{m}$ ; y por último en la cima de la secuencia se encuentra la capa de suelos y/o coluvios que presentan resistividades variables. Los datos obtenidos en el campo de las resistividades de los materiales se encuentran en anexos.



**Figura 24.** Modelo de correlaciones geológicas según el perfil eléctrico (P1).



En el perfil 2 (P2) en la figura 25 se define un modelo de 6 capas a partir los datos de resistividad obtenidos en el campo de los materiales geológicos, este modelo de 6 capas se simplifica en un modelo de 3 capas; la secuencia inicia en la base con brechas, las cuales presentan resistividades de 35-1000  $\Omega\text{m}$ ; sobreyaciendo se encuentran piroclastos arcillosos, que se caracterizan por resistividades de 2,9 a 7,2  $\Omega\text{m}$ . Posteriormente, se encuentran depósitos con resistividades entre 17 y 19  $\Omega\text{m}$ , que se asocian a piroclastos indiferenciados; siguen los piroclastos meteorizados con resistividades entre 9 y 19  $\Omega\text{m}$ . En la cima de la secuencia se encuentran los depósitos de epiclástos brechosos con resistividades de 20 a 450  $\Omega\text{m}$ ; sobreyacido por suelos y coluvios con resistividades variables.



**Figura 25.** Modelo de correlaciones geológicas según el perfil eléctrico (P2).

#### 4.4 Hidrogeología

Con base en el análisis de la información de pozos de la base de datos de SENARA e información de campo se define la unidad hidrogeológica que es captada por los pozos de la zona (figura 26 y 27), se construye la red de flujo, y se modela mediante un perfil la condición hidrogeológica del área de estudio, además se determinan las características hidráulicas generales de la unidad acuífera.

La información de pozos no contenía información de transmisividad (T) y conductividad hidráulica (K) para todos los pozos, por lo que se calcularon valores teóricos para los mismos, calculados con la formula  $T = K \times b$ , donde b es el espesor del acuífero en metros, el espesor del acuífero se determinó con la información de los pozos; y K es la conductividad hidráulica (m/día), obtenida de las pruebas de bombeo realizadas en los pozos. Los valores de transmisividad (T) y conductividad hidráulica (K) calculados se identifican en el anexo 5 con un asterisco.

En el Anexo 5, se muestra un cuadro con la información de los pozos consultados para el análisis realizado.

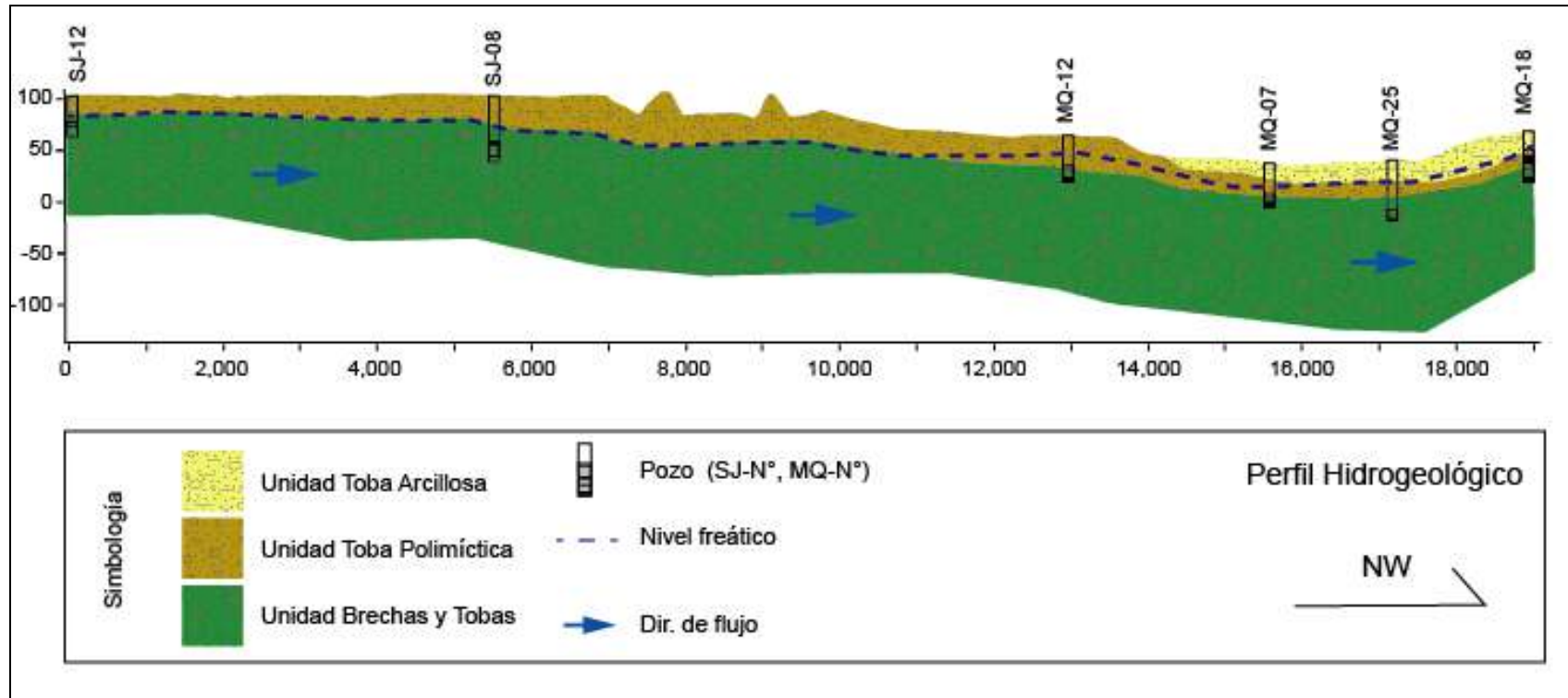
Según la información de pozos de la base de datos del SENARA y MINAE, se analiza preliminarmente que la estratigrafía está compuesta principalmente por intercalaciones de depósitos vulcanoclásticos (tobas y lahares). Como se observa en el perfil geológico (Figura 25) en la zona se encuentra una unidad compuesta por matriz arcillosa con fragmentos volcánicos y lentes de arenosos con espesores mínimos de 25 m, esta capa es muy poco permeable. Subyaciendo se encuentran intercalaciones de materiales tobáceos (Alvarado & Tournon, 1997), compuestos principalmente por tobas de ceniza que actúan como acuitardos; tobas líticas compuestas por una matriz arenosa con fragmentos líticos volcánicos y tobas consolidadas; además brechas compuestas por bloques volcánicos andesíticos parcialmente consolidadas, estas dos últimas litologías componen la unidad acuífera. El contenido de arcillas en las unidades sobreyacente y en la unidad acuífera es significativo lo que reduce la porosidad y permeabilidad del mismo, por lo que la producción de agua es moderada.

El nivel del agua subterránea se encuentra entre los 12 m y 26 m bajo el nivel del terreno, debido a que la capa que sobreyace la unidad acuífera tiene un espesor de 25 m y el rango de los niveles freáticos se trata de un acuífero libre en el sector sur a libre cubierto en el sector norte. La unidad acuífera presenta transmisividades variables entre 9,78 y 170,3 m<sup>2</sup>/d, y en los pozos MQ-37, MQ-22 y MQ-31 se calculan valores de 10,5 m<sup>2</sup>/d, 58,3 m<sup>2</sup>/d y 98,8 m<sup>2</sup>/d, respectivamente, según las pruebas de bombeo realizadas en dichos pozos. De igual forma para dichos pozos se calculó la conductividad hidráulica con la fórmula que indica que la transmisividad del acuífero entre el espesor aproximado del acuífero es igual a la conductividad hidráulica, obteniendo valores de 0,26 m/d, 2,24 m/d y 3,29 m/d, respectivamente.

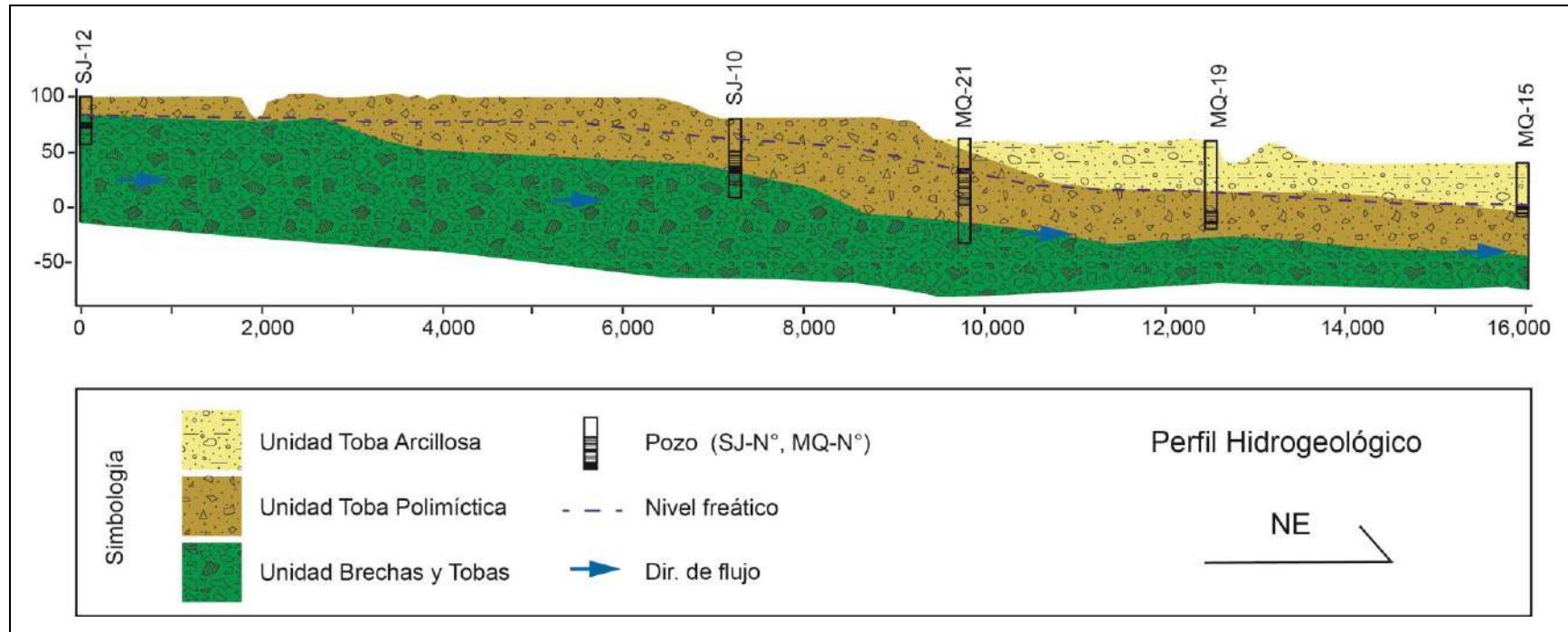
Además, se podrían correlacionar cambios en la transmisividad reportada y caudales extraídos de los pozos según los registros de SENARA. Donde se puede evidenciar según los datos del anexo 5, que las transmisividades (T) se encuentran entre 76 m<sup>2</sup>/d hasta un máximo de 170 m<sup>2</sup>/d aproximadamente en la región sur del área de estudio, cerca de la zona donde se traza la falla inversa que afecta la parte media del área de estudio; los caudales (Q) de extracción registrados en los pozos se encuentran entre los 10 l/s y 5 l/s. Sin embargo, en la zona norte del área de estudio se encuentran valores de transmisividad (T) inferiores que en promedio varían entre los 9 m<sup>2</sup>/d y 36 m<sup>2</sup>/d; y los caudales (Q) que se reportan están entre los 5 l/s y 2 l/s, los pozos captan la unidad acuífera compuesta por brechas y tobas. Esto indicaría que después de la zona de falla el acuífero presenta menor transmisividad y menos caudal. Estas correlaciones no se realizaron para la conductividad hidráulica (K) debido a que no se observó una relación evidente debido al déficit de datos de K en los pozos cercanos.

En las figuras 25 y 26, se encuentra representado el modelo hidrogeológico, en estos se encuentran las tres unidades descritas en la geología local del área de estudio. La unidad de tobas arcillosas son materiales poco permeables a impermeables por lo que actúan como acuitardos. Son las unidades tobas polimícticas y brechas y tobas las unidades geológicas con permeabilidades medias, las cuales conforman la unidad hidrogeológica. Con la información de pozos, se detalla que la unidad está compuesta de intercalaciones de tobas de ceniza de color gris a negro con granulometría de arena gruesa a media, con estados de consolidación variable, como por ejemplo las brechas duras con matriz cenicienta; además presenta intercalaciones de tobas de grano fino de

color gris a verde que actúan como capas sello. En el anexo 5 y en los modelos hidrogeológicos de las figuras 25 y 26 se determina que los pozos captan las tobas arenosas de color gris a negro con fragmentos volcánicos, por lo tanto, la unidad hidrogeológica de la zona es la unidad de brechas y tobas que se asocia a la formación Venado.



**Figura 26.** Perfil hidrogeológico del sector noroeste de la zona de estudio, definición de la unidad acuífera, dirección de flujo y niveles freáticos (Ambos ejes X y Y, del perfil presentan unidades de metros)



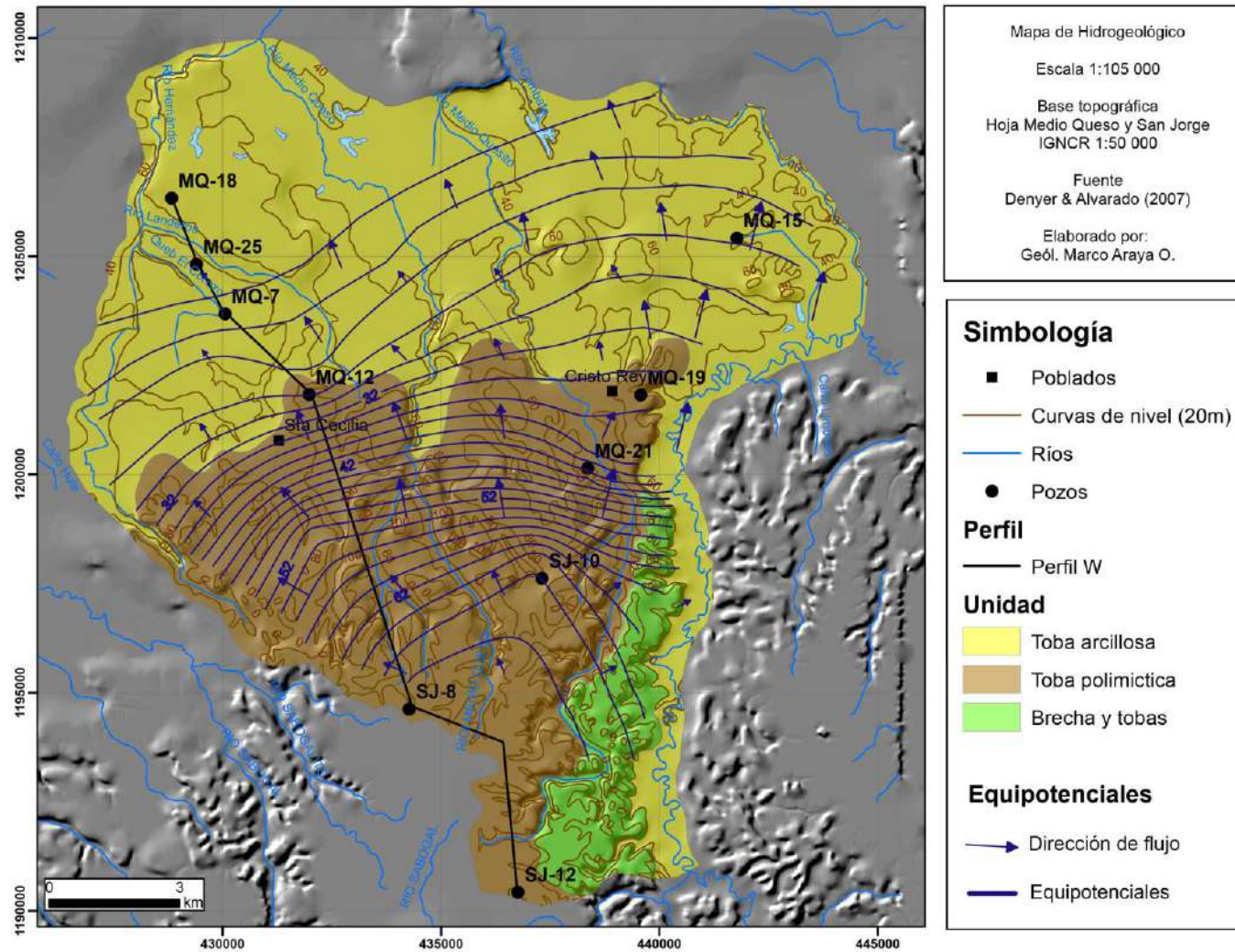
**Figura 27.** Perfil hidrogeológico del sector noreste de la zona de estudio, definición de la unidad acuífera, dirección de flujo y niveles freáticos (Ambos ejes X y Y, del perfil presentan unidades de metros).

Además, en los perfiles, el nivel estático se encontró entre 9 y 30 metros. En la parte alta del perfil (al sur del área de estudio) el acuífero se encuentra únicamente en las brechas y tobas debido al poco espesor de la toba polimíctica y a que el nivel freático se encuentra por debajo de dicha litología, mientras que hacia el noroeste o en la parte baja del perfil (al norte del área de estudio) el acuífero incorpora los depósitos de la unidad toba polimíctica ya que las brechas se encuentran más profundas y la toba polimíctica incrementa su espesor; también en esta sección se encuentran las tobas arcillosas cubriendo esta parte del acuífero.

Con la información de los pozos y los niveles freáticos y piezométricos se realizó un modelo de equipotenciales y se determinó el flujo del agua subterránea; el cual se mueve en dirección norte a noroeste. Aunque se trata de una única unidad hidrogeológica la misma tiene variaciones en los niveles de agua, por lo que la red de flujo y la dirección del mismo es una representación promedio del flujo de agua subterránea de la zona.

En la figura 27, se observa la red de flujo del acuífero de la zona donde el agua subterránea presenta un flujo en dirección norte a noroeste, además es evidente una diferencia entre las equipotenciales en la región norte y las equipotenciales en la región media por lo que calculan dos gradientes hidráulicos, en la parte media se obtiene un gradiente de  $9,09 \times 10^{-3}$ , y en la región norte del área de estudio se obtiene un gradiente de  $2,57 \times 10^{-3}$ . Esto evidencia el flujo lento del agua subterránea, en la zona media debido a la pendiente el flujo presenta un gradiente mayor, pero de igual forma ambos son valores bajos.





**Figura 28.** Mapa hidrogeológico y red de flujo subterráneo, del área de estudio.



En la cuenca del Pocosol se encuentran dos acuíferos, según Rojas *et al.* (2011). Uno se encuentra en Los Chiles y rinde caudales entre 1 y 6 l/s y presenta un espesor de 15 metros. El segundo acuífero se encuentra en San Rafael, y el caudal varía entre 1 y 5 l/s y también tiene un espesor de 15 metros aproximadamente. En comparación con los resultados obtenidos en este estudio, se define una unidad acuífera compuesta por tobas volcánicas y brechas de la formación Venado, que tiene espesores desde 15 m hasta 40 m. Con caudales de extracción de 2 a 10 l/s aproximadamente. La extensión del acuífero abarca todo el distrito del Amparo y alrededores.

#### 4.5 Hidrogeoquímica

Se realizaron dos muestreos siguiendo la metodología indicada en la sección 1.6 con los instrumentos indicados en la sección 1.8.1. Uno de los muestreos se realiza en época seca en la semana del 25 al 28 de enero del 2016 y el otro en época lluviosa en la semana del 25 a 26 de octubre del 2016. Ambos muestreos se realizaron utilizando una red de pozos preexistentes en la zona (Figura 28), que captan la misma unidad hidrogeológica, además se toman muestras en transeptos a lo largo de una línea que sigue el flujo del agua subterránea como parte de un muestreo de probabilidad.



Se determinan dos sectores en el área de estudio, el sector noreste en el cual se ubican las localidades de San Antonio, Cobano, Cristo Rey y Las Nubes, de sur a norte según el flujo del agua subterránea (figura 29). El sitio de muestreo en la localidad de Cobano fue muestreado únicamente en la época seca debido a su difícil acceso y caminos en mal estado fue imposible realizar el muestreo en la época lluviosa.

El sector noroeste, se ubican las siguientes localidades de sur a norte en dirección al flujo de agua subterránea: Pavón (pozo No. 3 y No.2), Vasconia, Gallito, San José, Tremedal 2, Santa Cecilia, La Virgen, Tremedal 1.

Las muestras fueron tomadas en pozos usados para consumo de distintas localidades, no son pozos de monitoreo, en pozos que se encuentran inscritos en SENARA por lo que tiene un código asignado por dicha institución, sin embargo, hay algunos pozos que fueron muestreados que no tienen código. Por lo tanto, se presenta un resumen en el cuadro 6 con la información sobre el número de muestra, fecha de muestreo, código de pozo asociado y localidad. Otros detalles de los pozos con código se muestran en el anexo 5.

**Cuadro 6.** Información del número de pozo con la respectiva localidad.

No. de muestra	Fecha de muestreo		Código de Pozo (SENARA)	Localidad
	Época seca	Época lluviosa		
1	01/25/2016	10/25/2016	MQ-1	San José
2	01/25/2016	10/25/2016	Sin código	Pavón1 (Pozo2)
3	01/25/2016	10/25/2016	Sin código	Pavon2 (pozo3)
4	01/26/2016	10/26/2016	MQ-25	Tremedal1
5	01/26/2016	10/26/2016	INV-216	Tremedal2
6	01/26/2016	10/25/2016	MQ-11	La Virgen
7	01/27/2016	10/26/2016	Sin código	San Antonio
8	01/27/2016	10/25/2016	MQ-22	Gallito
9	01/27/2016	10/25/2016	MQ-22	Gallito (duplicado)
10	01/27/2016	10/26/2016	Sin código	Vasconia
11	01/27/2016	10/26/2016	SJ-10	Cobano
12	01/28/2016	10/25/2016	MQ-12	Santa Cecilia
13	01/28/2016	10/25/2016	MQ-19	Cristo Rey
14	01/28/2016	10/25/2016	MQ-15	Las Nubes

Para el análisis de los resultados de la composición química del agua subterránea, se muestrearon 13 pozos y se delimitaron dos perfiles transversales a la dirección al flujo, uno en el sector noroeste y otro en el sector noreste. Los muestreos se realizaron en la estación seca y la estación lluviosa con el afán de determinar variaciones estacionales.

Las aguas de la zona se clasificación según el diagrama Piper en aguas bicarbonatadas cálcicas con excepción de las aguas de los pozos No. 6 y No. 13 las cuales se clasifican como bicarbonatadas sódicas.

Los principales parámetros comparados para ambas estaciones fueron el pH, conductividad eléctrica, alcalinidad, oxígeno disuelto, sodio, potasio, calcio, magnesio, arsénico, hierro y manganeso. El pH muestra valores entre 6,01-7,89 en el sector noreste y no se logra determinar una relación directa entre la estación seca y lluviosa (Anexo 2). En el sector noroeste se encuentran valores de pH entre 4,70-8,58 donde los valores mayores se presentan en la época lluviosa. Esto indica que en la época seca las aguas

subterráneas son más ácidas mientras que en la época lluviosa son más básicas, por lo tanto, se espera que las concentraciones de arsénico sean mayores en la época seca.

La conductividad eléctrica fue otro de las variables que se compararon según la estación, la cual presentó valores superiores en la época seca en comparación con la época lluviosa, esto se puede deber a que existe una recarga menor al acuífero en la época seca por lo tanto la concentración de los iones en disolución provoca aumento de la conductividad eléctrica. Por su lado en la época lluviosa la recarga acuífera provocará que las concentraciones disminuyan debido a la adición del solvente (agua) y los iones disueltos de las rocas tendrán menos influencia en la conductividad eléctrica. Por la misma razón la alcalinidad es mayor en la época seca.

El oxígeno disuelto tiende a ser superior en la época lluviosa en el sector noroeste, se explica de igual forma por la recarga de aguas meteóricas ricas en oxígeno; mientras en el sector noreste no se observa una relación evidente con las estaciones, probablemente debido a problemas con el muestreo y estabilización de parámetros. Especialmente este parámetro de oxígeno disuelto es muy difícil de medir con exactitud debido a la sensibilidad en las variaciones.

De las principales especies de interés como el As, Fe y Mn se obtuvieron valores muy superiores en la estación seca y valores cercanos a cero en la estación lluviosa. En estos análisis se esperaba una disminución en las concentraciones de estas especies, debido a mayor recarga, menor evaporación y a otros aspectos mencionados anteriormente.

Se realizaron gráficos con las principales relaciones entre las especies iónicas y otros parámetros de interés. Donde de forma general se pudo interpretar que hay una relación inversa entre las concentraciones de Mn y Fe en disolución, las concentraciones de As total, ya que estas son menores cuando el Mn y Fe son mayores debido a las reacciones de adsorción que favorecen los óxidos de Fe y Mn. También se pudo observar como conforme aumentan los valores conductividad eléctrica también aumentan las concentraciones de arsénico total y de arsenito, sin embargo, con el arsenato no se pudo determinar la misma relación. Esta misma relación se encontró con el pH y las concentraciones de As también, por lo tanto, en la zona el arsénico incrementa en

condiciones más básicas. El pH en el agua subterránea de la zona de estudio es principalmente neutro, con tendencias básicas.

El arsénico tiende a ser menor conforme aumenta el oxígeno disuelto en el agua, esto se explica ya que en medios oxidantes los óxidos con propiedades adsorbentes son más abundantes.

En los perfiles realizados en la zona de estudio, se observa una tendencia general de las concentraciones de arsénico crecientes con el flujo del agua subterránea, en dirección norte. Sin embargo, hay una disminución en las concentraciones en la zona de la falla inferida y luego vuelven a aumentar hacia el norte. Por su parte el hierro y el manganeso presentan una tendencia cóncava hacia abajo, donde las concentraciones aumentan hacia la zona de falla y disminuyen después de la misma (hacia el norte). Esto es coincidente con las concentraciones de arsénico, esto se puede explicar debido a la alteración en la zona de falla donde aumentan los óxidos de hierro y de manganeso y la disolución de los mismos y por lo tanto, al haber disolución de los óxidos hay liberación del arsénico adsorbido por estos, por eso se detecta el aumento en la concentración de arsénico en disolución.

El aluminio y el arsénico se graficaron juntos debido al comportamiento opuesto, conforme aumentan las concentraciones de arsénico disminuyen las concentraciones de aluminio, y conforme aumentan las concentraciones de aluminio disminuyen las de arsénico. Esto se asocia a procesos de intercambio iónico en las arcillas que son principalmente aluminosilicatos, donde hay bajas concentraciones de arsénico hay mucho aluminio y por lo tanto arcillas que adsorben al arsénico, mientras que cuando tenemos arsénico en altas concentraciones el aluminio disminuye debido a que no hay tantas arcillas en el medio.

Las relaciones de las concentraciones de sílice, oxígeno disuelto y carbono orgánico total presentan comportamientos más aleatorios que no pueden describirse como tendencias fijas, de igual forma se determina que conforme aumenta el oxígeno en disolución disminuye el arsénico, debido a la presencia de óxidos. El sílice podría esperarse que se comporte igual al arsénico, indicando mayor disolución y descomposición de arcillas.

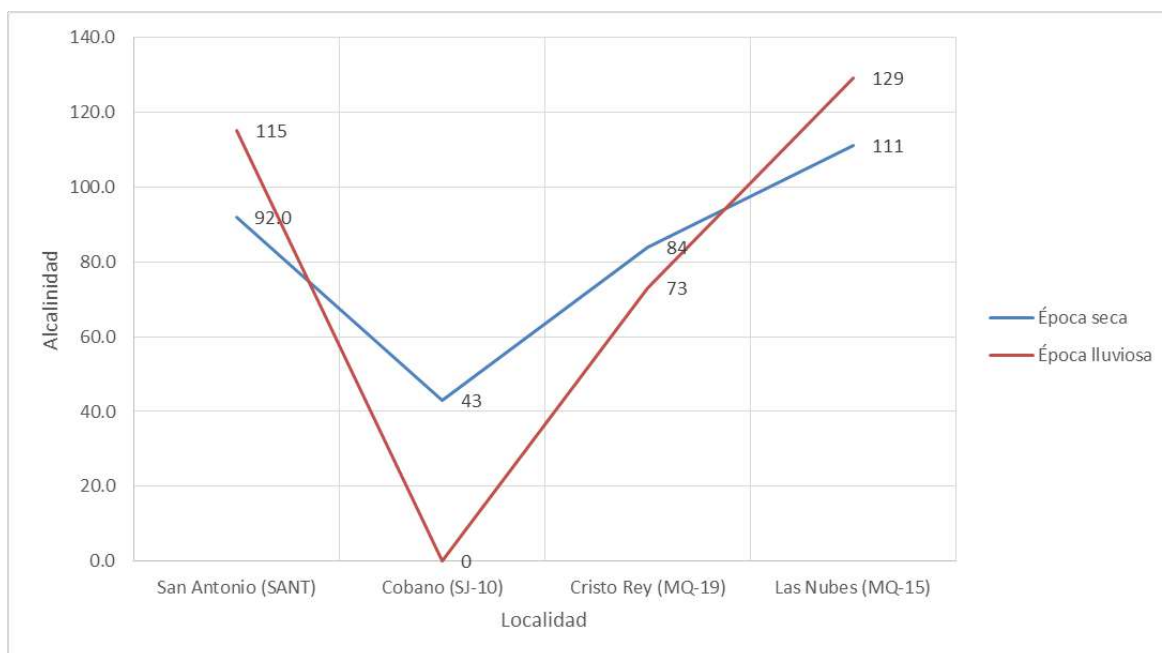
#### 4.5.1 Parámetros de campo

##### 4.5.1.1 Alcalinidad

Los valores de alcalinidad se exponen en los gráficos 8 y 9, de igual forma se presentan primero los datos obtenidos en el sector sureste y posteriormente los datos obtenidos en el sector noroeste.

En el sector noreste en la época seca, se observa una tendencia similar a la observada con los valores de pH, donde la alcalinidad presenta un valor similar en los extremos sur y norte del sector y valores inferiores hacia el centro del sector, esto era esperado tomando en cuenta la relación que existe entre el pH y la alcalinidad. En la parte sur del sector sureste se observan valores de 92,0 mg/L, posteriormente los valores bajan hacia las localidades de Cobano y Cristo Rey, con valores que varían entre los 43 mg/L y 84 mg/L, mientras que hacia el norte los valores aumentan a 111 mg/L.

En el sector noreste en la época lluviosa, la tendencia se mantiene, pero los valores de alcalinidad son superiores en todos los sitios. Se presentan valores de 115 mg/L en el sur del sector, hacia el sector de Cristo Rey descienden a 73 mg/L y aumentan hacia la localidad de Las Nubes a 129 mg/L.

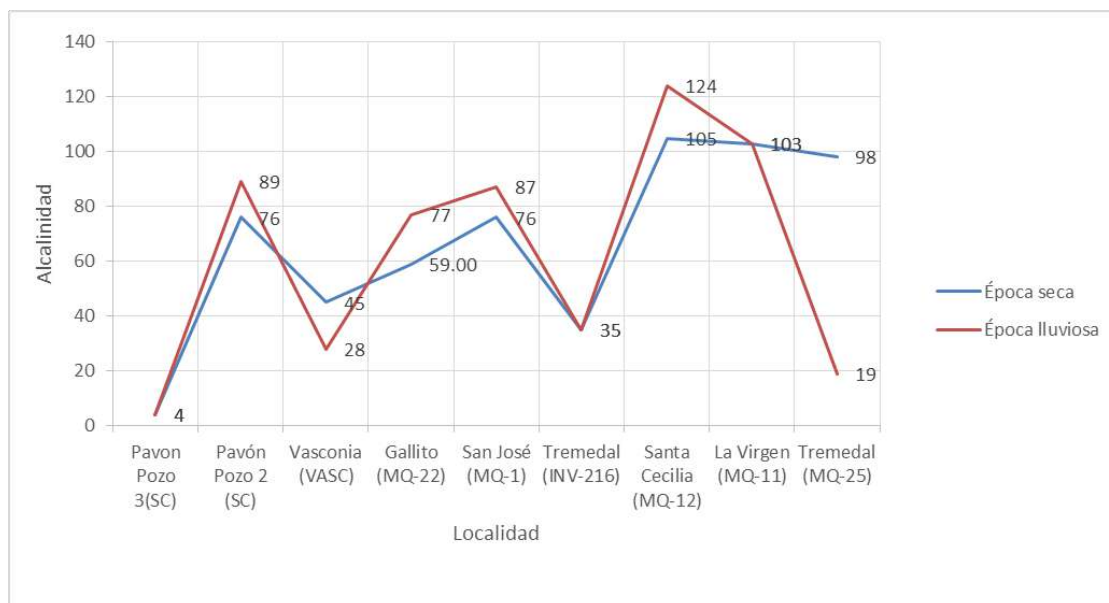


**Gráfico 8.** Alcalinidad en el sector noreste del área de estudio.

En el sector noroeste en la época seca se observa una tendencia similar donde los valores de alcalinidad son bajos hacia el sur del sector con excepción del pozo No. 2 de Pavón, en cual presenta un valor de 76 mg/L. Los valores varían entre 4 mg/L y 76 mg/L. Después de la localidad de Santa Cecilia hacia el norte del sector los valores de alcalinidad aumentan a valores entre los 98 mg/L y 105 mg/L. En la época lluviosa se mantiene la misma tendencia, pero los valores tienden a ser mayores en todos los sitios, con excepción del sitio del tremedal 1 el cual se ubica en las cercanías de Las Nubes, este presenta un valor muy bajo de 19 mg/L; y el sitio en la localidad de Vasconia también presentó un valor inferior en la época lluviosa el cual se reporta como 28 mg/L.

Estos valores de alcalinidad y las variaciones en las concentraciones se pueden correlacionar con el pH ya que es coincidente que los extremos norte y sur de los sectores presentan valores pH cercanos a la neutralidad o ligeramente básicos, lo cual es compatible con las concentraciones altas de alcalinidad, mientras que en el sector central en las cercanías de Santa Cecilia y Cristo Rey los pH son más ácidos y la alcalinidad más baja. La nomenclatura S.C. significa pozos sin código.





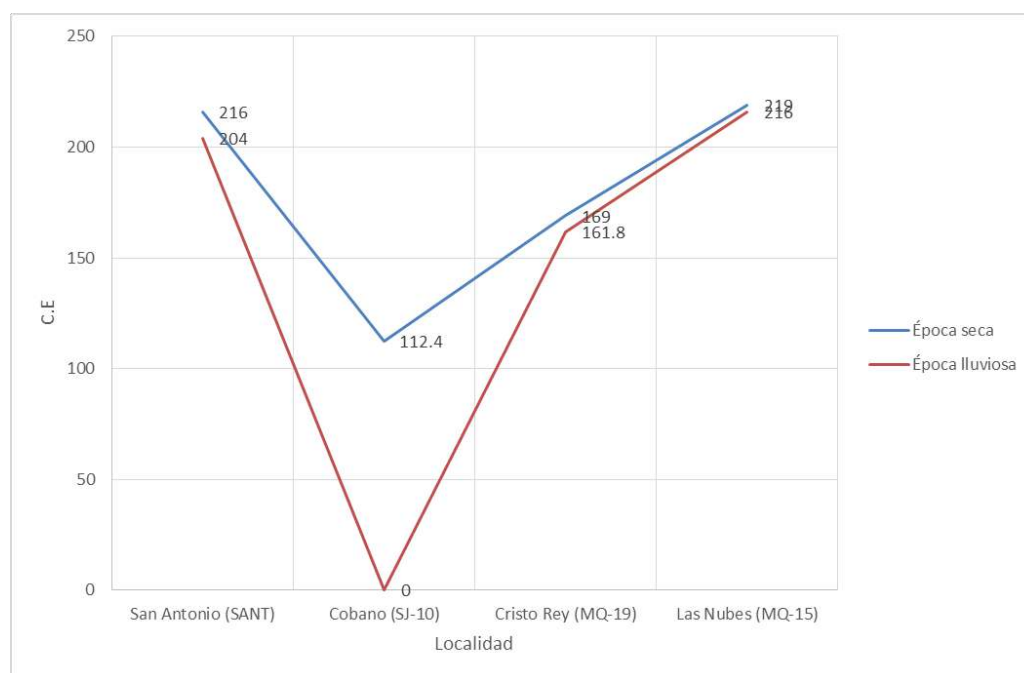
**Gráfico 9.** Alcalinidad en el sector noroeste del área de estudio.

#### 4.5.1.2 Conductividad Eléctrica

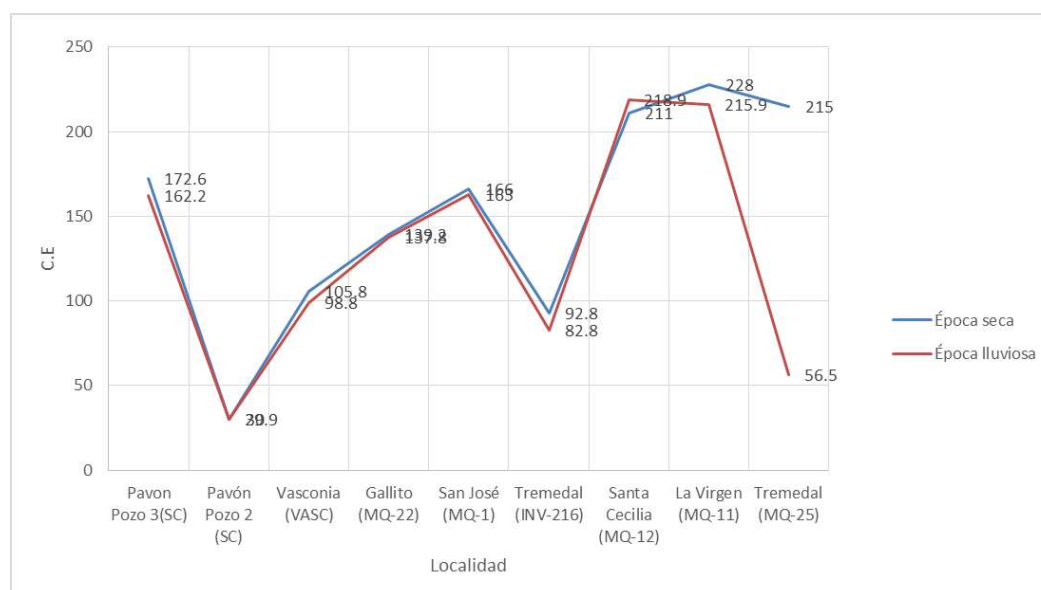
Los valores de conductividad eléctrica se exponen en los gráficos 10 y 11. En el sector noreste se observa la misma tendencia ascendente hacia el norte de área de estudio; más específicamente se observan valores de 216 uS/cm, este valor desciende en las localidades de Cobano y Cristo Rey a valores de 112,4 uS/cm y 169 uS/cm, respectivamente. Posteriormente se observan valores de 219 uS/cm en la localidad de Las Nubes evidenciando un ascenso en la conductividad del agua subterránea. En la época lluviosa se mantiene la misma tendencia únicamente que los valores de conductividad en general son inferiores, presentando valores de 204 uS/cm en la localidad de San Antonio, descendiendo a valores de 161,8 uS/cm en Cristo Rey y después aumentando a valores de 216 uS/cm hacia el sector Las Nubes.

La tendencia en el sector noroeste, es coincidente ya que se presentan valores de conductividad eléctrica de alrededor de 172,6 uS/cm en el sector sur, los cuales bajan a valores alrededor de 30 uS/cm a 166 uS/cm en el hacia la parte central del sector y después aumentan desde Santa Cecilia hasta Las Nubes con valores entre 211 uS/cm a 228 uS/cm. De igual forma en la época lluviosa se mantiene la tendencia excepto que los valores son ligeramente más bajos que en la época seca. El descenso es más fuerte en el

sitio del Tremedal 1 donde los valores de conductividad registrados fueron de 56,5 uS/cm, mucho más bajos que los registrados en la época seca (215 uS/cm) (Gráfico 11).



**Gráfico 10.** Conductividad eléctrica (C.E) en el sector noreste del área de estudio.

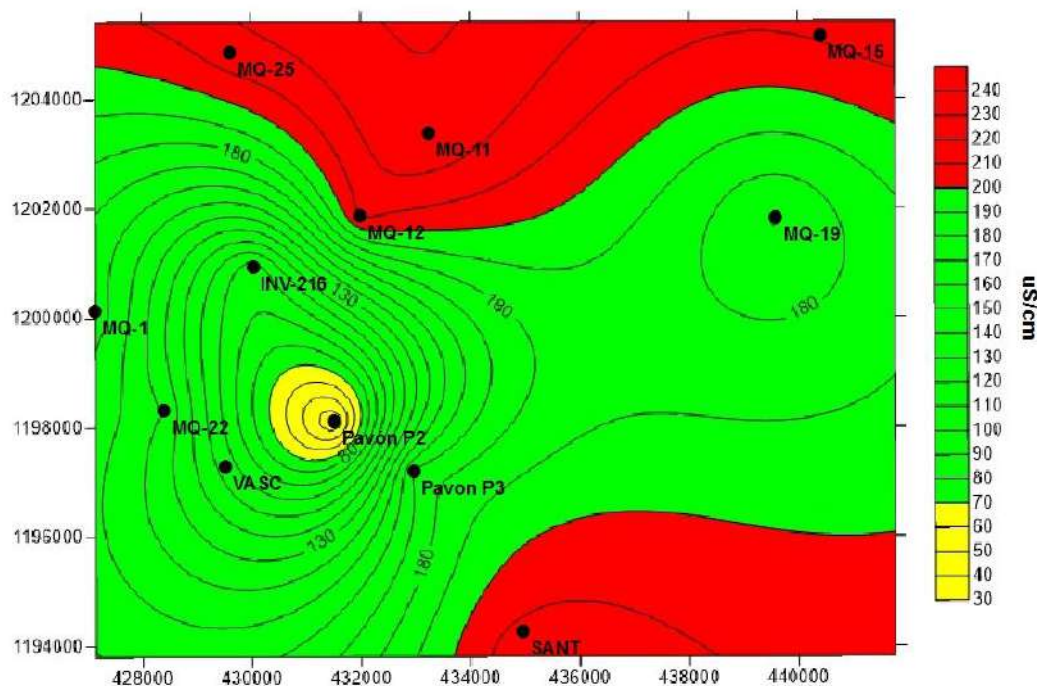


**Gráfico 11.** Conductividad eléctrica (C.E) en el sector noroeste del área de estudio.

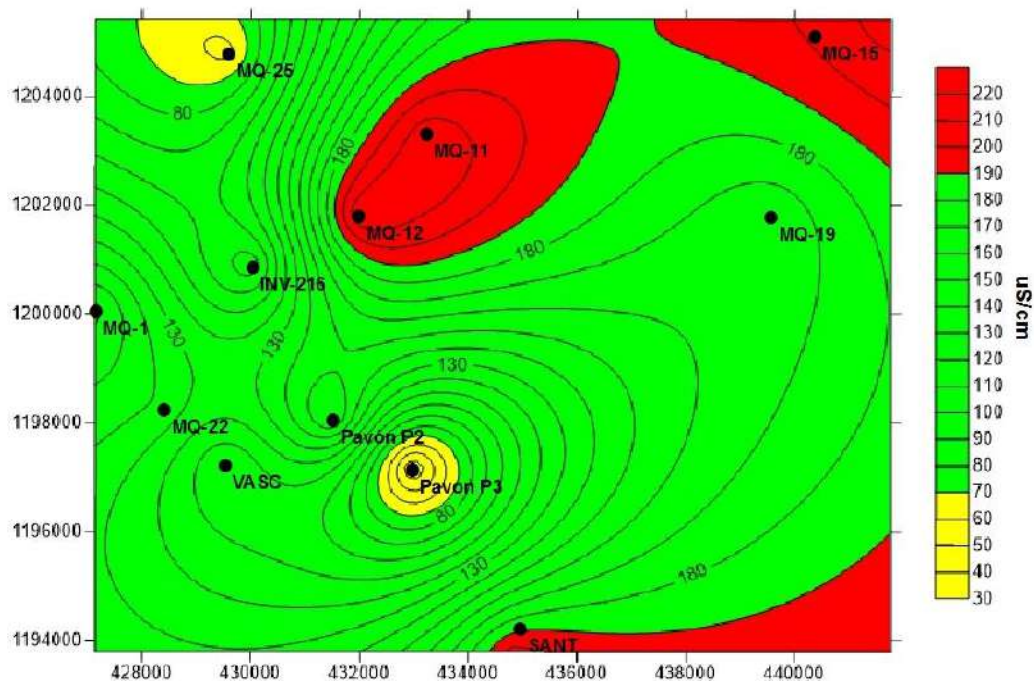
En los gráficos 12 y 13, se representa la distribución de la conductividad eléctrica (C.E) en el área de estudio donde se evidencia que en la época seca aumenta el área con valores de conductividades eléctricas superiores a los 200 uS/cm mientras que en la zona central del área las conductividades eléctricas son menores. Esto se puede deber a menos disolución hacia el norte y el sur del área de estudio, mientras que la zona donde los valores son menores coincide con la zona de falla, incluso tiene la dirección oeste-este, igual que la falla inferida en dicha zona.

Mientras que en la época lluviosa se evidencia que los valores de conductividad eléctrica predominantes se encuentran entre 80 uS/cm y 200 uS/cm, evidenciando que debido a la infiltración de aguas meteóricas y la disolución estos valores disminuyen. O por otro lado se evidencia la infiltración superior que hay en esta época y el efecto sobre la composición del agua.

Es importante recalcar que según el Reglamento de calidad de agua potable (CAP) se establece como un valor recomendado de conductividad eléctrica de 400 uS/cm para agua de consumo humano por lo que todos los valores medidos en las muestras cumplen con dicha normativa, ya que son inferiores al valor recomendado.



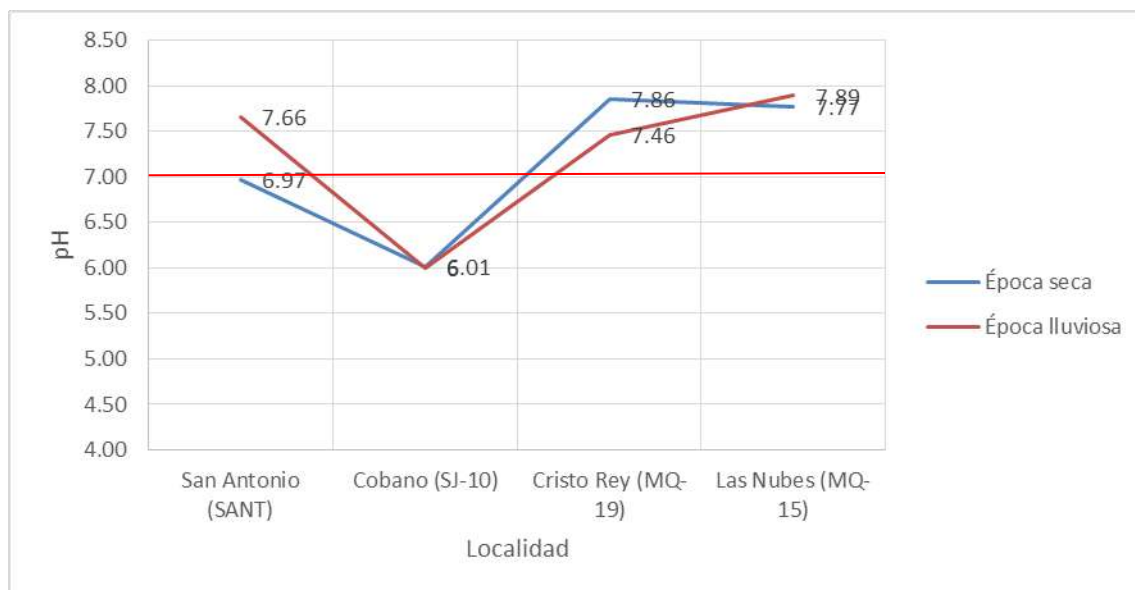
**Gráfico 12.** Conductividad eléctrica (C.E) unidades (uS/cm) en el área de estudio en la época seca.



**Gráfico 13.** Conductividad eléctrica (C.E) (uS/cm) en el área de estudio en la época lluviosa.

#### 4.5.1.3 pH

Los valores de pH se exponen en los gráficos 14 y 15, según los dos sectores en los que se separó la zona de estudio. En los datos obtenidos en la época seca en el sector sureste, se observan valores de pH entre 6,01 y 6,97 al sur de Cristo Rey y hacia el norte los valores aumentan de 7,77 a 8,86. Por lo tanto, se observan valores ácidos en el sur y valores básicos hacia el norte del área de estudio. En los datos de época lluviosa los valores de pH se mantuvieron más estables cerca de valores neutros, entre 7,46 y 7,89, tanto al sur como al norte del área de estudio.

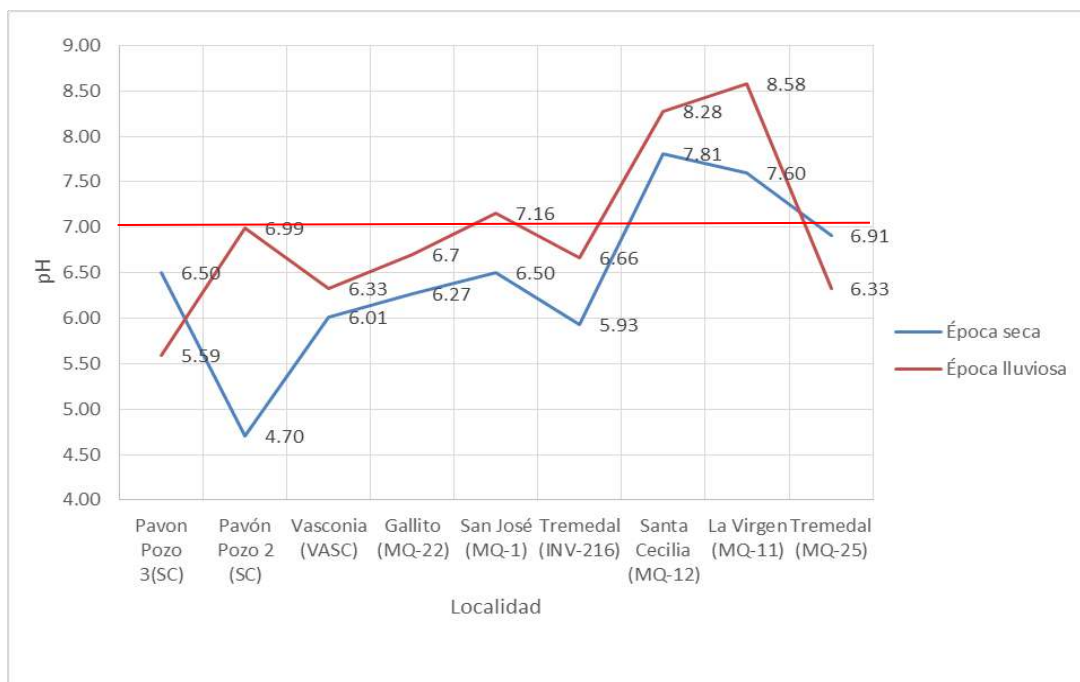


**Gráfico 14.** Valores de pH en el sector noreste del área de estudio.

\*La línea roja corresponde con el valor máximo admisible.

La misma tendencia se observa en el sector suroeste en la época seca (gráfico 14) donde los valores de pH hacia el sur de la localidad de Santa Cecilia se encuentran entre 5,93 y 6,50, excepto en Pavón donde el pozo No. 2 presenta un pH entre 4,70; hacia el norte de la localidad de Santa Cecilia los valores de pH aumentan entre 6,91 y 7,81. Por lo tanto se mantiene la tendencia de valores de pH ácidos al sur del sector y valores neutros hacia el norte del sector noroeste.

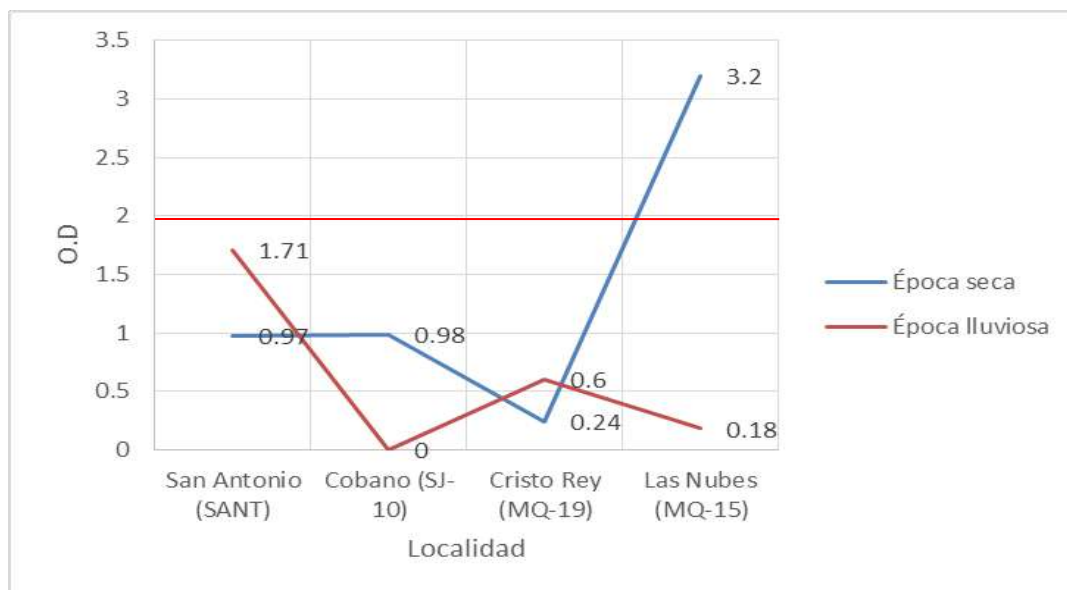
En la época lluviosa los valores de pH aumentan acercándose a la neutralidad en los casos donde se presentó un pH ligeramente ácido en la época seca, y estados ligeramente básicos en los sitios donde los valores fueron neutros en la época seca. En el sur del sector los valores de pH se mantuvieron entre 5,59 y 7,16; y al norte del sector los valores de pH aumentaron a valores entre 6,33 y 8,58. Se mantiene la tendencia donde los pH son ligeramente más ácidos en el sur que en el sector norte donde son valores neutros a básicos.



**Gráfico 15.** Valores de pH en el sector noroeste del área de estudio.

#### 4.5.1.4 Oxígeno disuelto

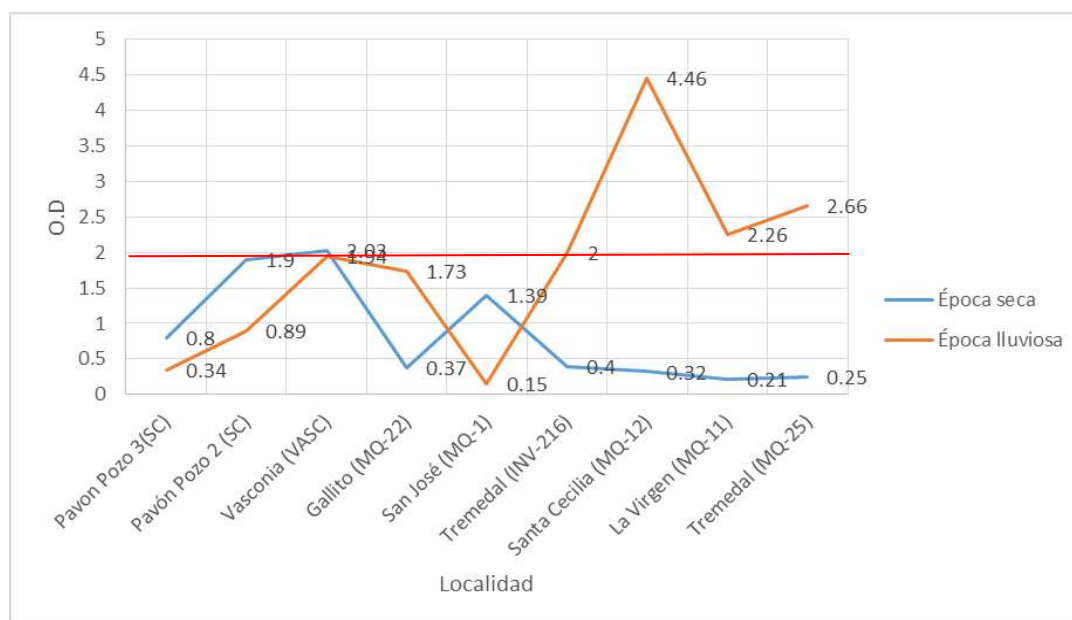
Los valores de oxígeno disuelto se exponen en los gráficos 16 y 17. En el sector sureste no se observa ninguna relación clara con las concentraciones de oxígeno disuelto, pero se observa que aumenta hacia el norte del sector y que todas las aguas son anóxicas, o se encuentran en condiciones anaeróbicas, excepto por la muestra tomada en la localidad de Las Nubes, durante el muestreo realizado durante la época seca.



**Gráfico 16.** Oxígeno disuelto en el sector noreste del área de estudio.

\*La línea roja corresponde con el valor máximo admisible.

En el sector noroeste se observa una tendencia decreciente hacia el sector norte en la época seca y una tendencia creciente hacia el sector norte en la época lluviosa. Todas las muestras son anóxicas o se encuentran en condiciones anaeróbicas, con valores promedio. Excepto las muestras tomadas en las localidades de Santa Cecilia, La Virgen y el Tremedal 1, durante el muestreo en la época lluviosa.



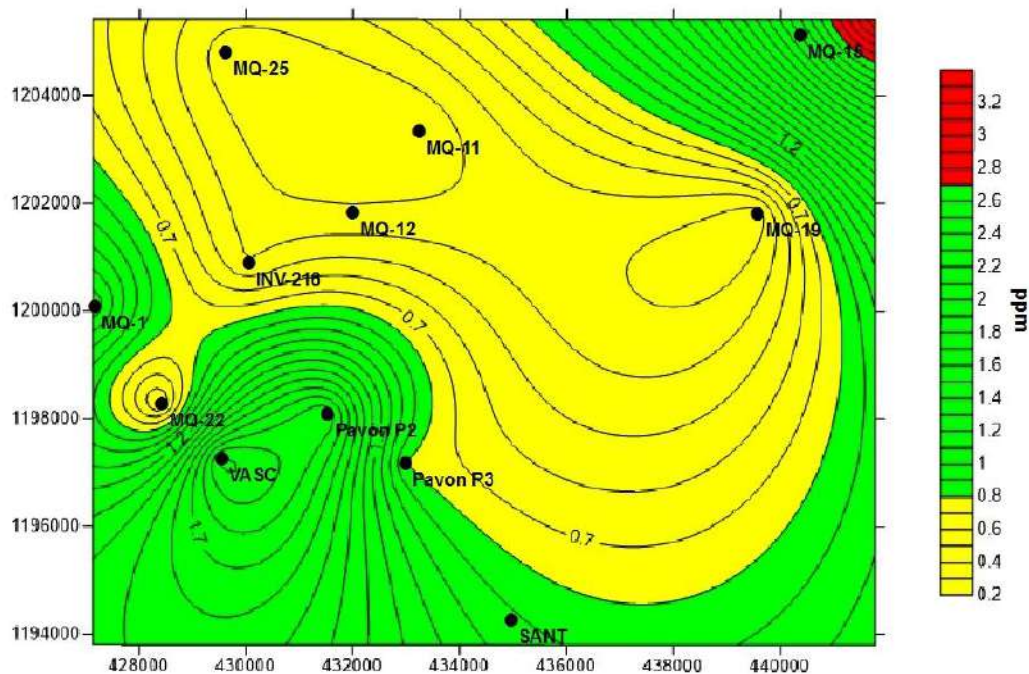
**Gráfico 17.** Oxígeno disuelto en el sector noroeste del área de estudio.



\*La línea roja corresponde con el valor máximo admisible.

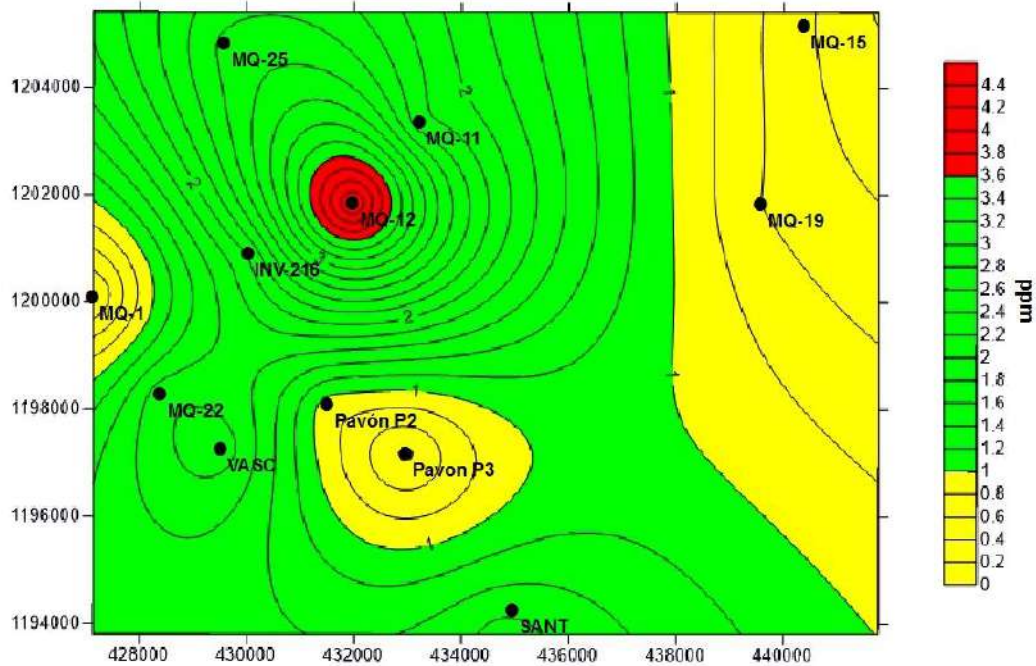
Es importante recalcar que se establece como un valor de referencia de 2 mg de O.D. donde por debajo del mismo se consideran aguas anóxicas y sobre el mismo aguas oxigenadas, y se determina que todas las muestras se clasificarían como anóxicas excepto en el sector norte del área donde sobrepasan el límite y se consideran oxigenadas.

Además, en los gráficos 18 y 19 se representan las concentraciones de O.D. y se observa que en la época seca predominan concentraciones entre 0,2 a 0,8 mg de O.D. Mientras que en la época lluviosa predominan las concentraciones superiores a 1 mg de O.D. evidenciando que hay influencia por aguas meteóricas que transportan oxígeno hacia el agua subterránea.



**Gráfico 18.** Oxígeno disuelto (ppm) en área de estudio en época seca.

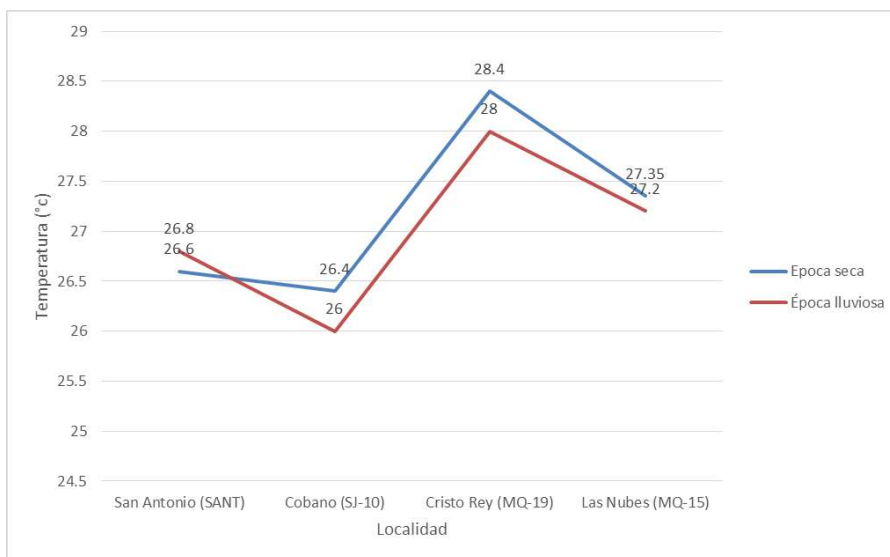




**Gráfico 19.** Oxígeno disuelto (ppm) en área de estudio en época lluviosa.

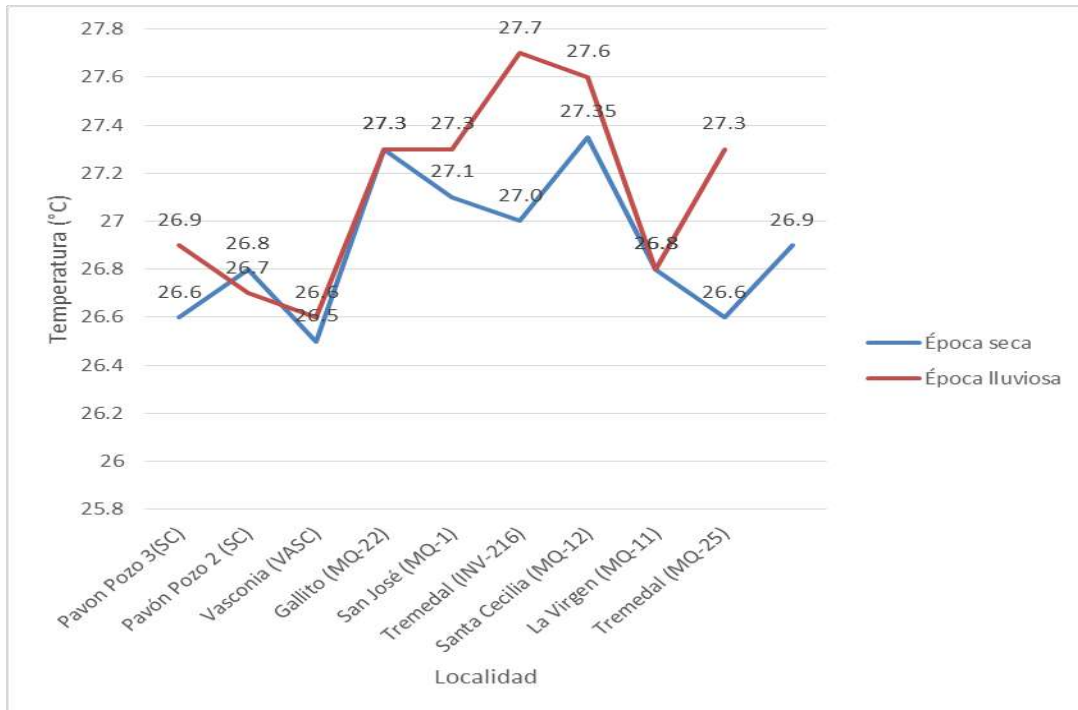
#### 4.5.1.5 Temperatura

En el sector sureste se observa que las temperaturas durante ambas épocas es similar, siendo ligeramente mayor en la época seca.



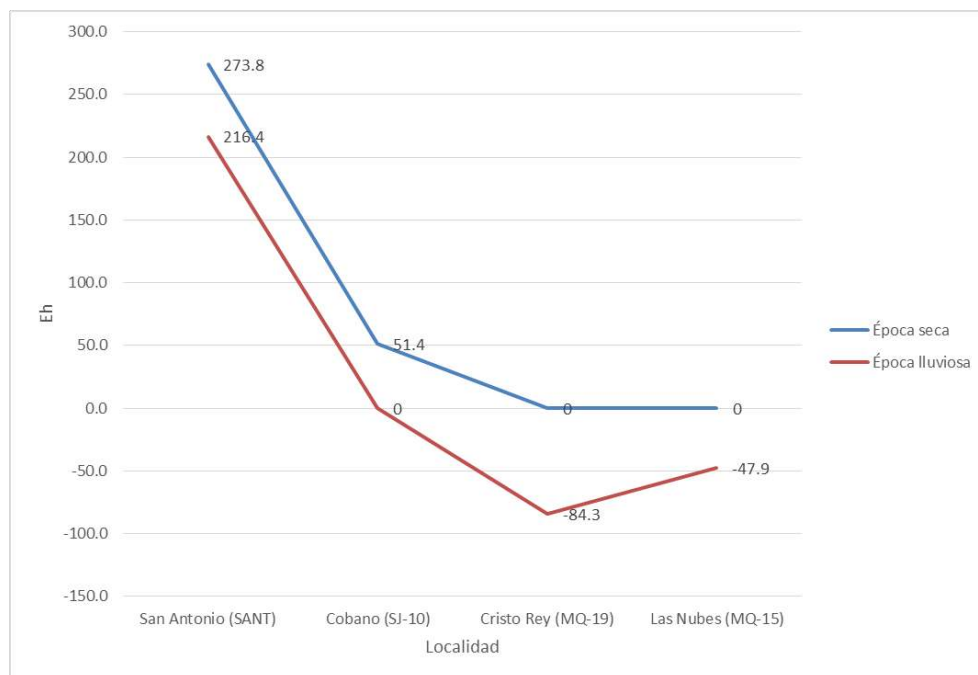
**Gráfico 20.** Variaciones de temperatura en el sector noroeste del área de estudio.

En el sector noroeste se observan valores similares, sin embargo, se registraron valores ligeramente superiores en la época lluviosa.



**Gráfico 21.** Variaciones de temperatura en el sector noroeste del área de estudio.

## 4.5.1.6 Eh



**Gráfico 22.** Variaciones de Eh en el sector noroeste del área de estudio.



**Gráfico 23.** Variaciones de Eh en el sector noroeste del área de estudio.

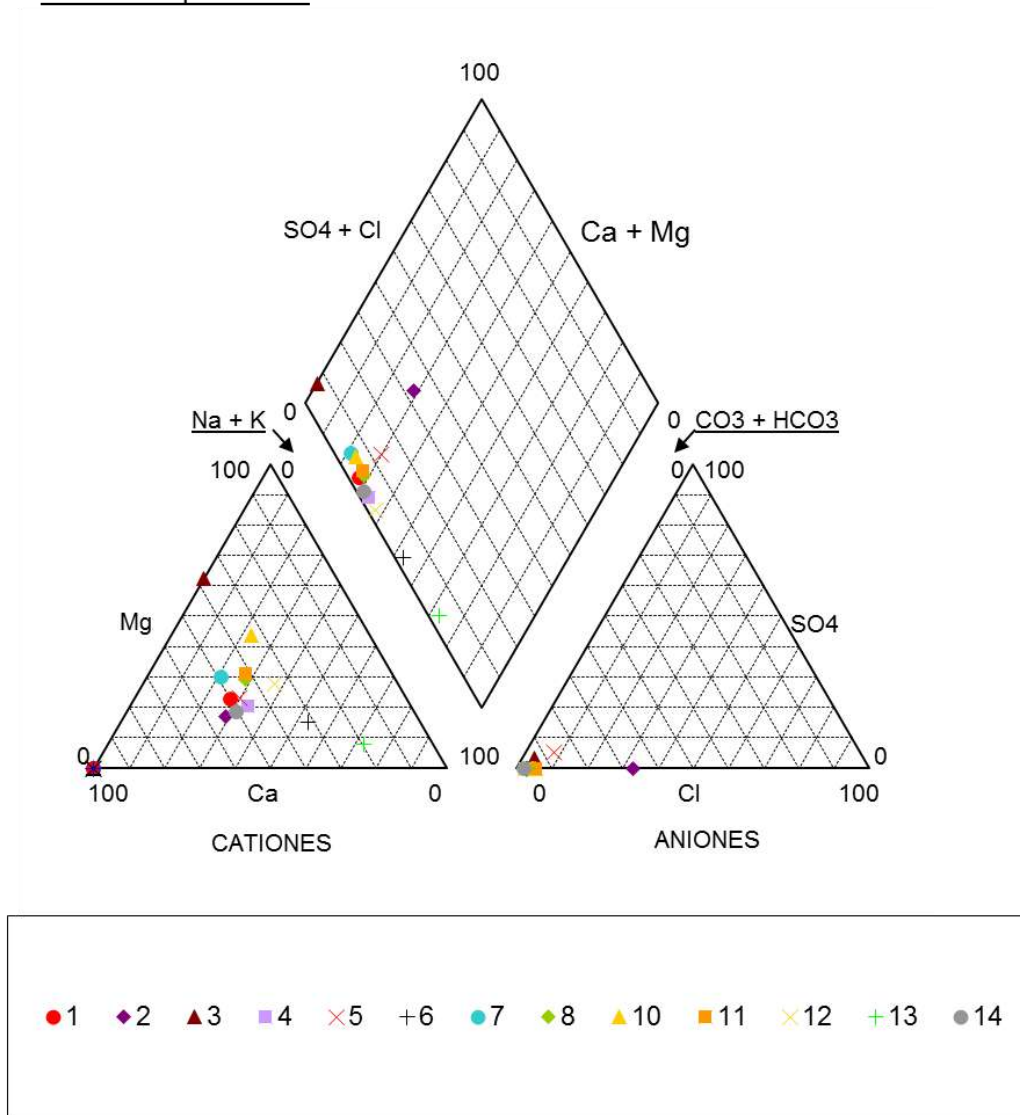
#### 4.5.2 Iones mayores

Los resultados de los principales aniones y cationes muestreados en la red de pozos indicada se expresan mediante un gráfico de Piper el cual permite clasificar el tipo de agua encontrada en cada sitio. En este caso se grafican las 13 muestras (gráfico 24 y 25) realizadas en el campo (la muestra No. 9 se realizaba como control, duplicando una muestra determinada de la red de muestreo por lo que no se presentan los resultados en ninguno de los gráficos).

En el gráfico 24 se muestran los resultados del muestreo en época seca donde se pueden observar como todas las muestras se clasifican como aguas bicarbonatadas cálcicas, excepto las muestras No. 6 y No.13 que corresponden con las localidades de La Virgen y Cristo Rey, respectivamente, estas muestras se clasifican como Bicarbonatadas sódicas. Las muestras No. 2 y No. 3, también se desvían un poco del grupo, aunque igual se clasifican como bicarbonatadas cálcicas.

## DIAGRAMA DE PIPER

Muestreo época seca



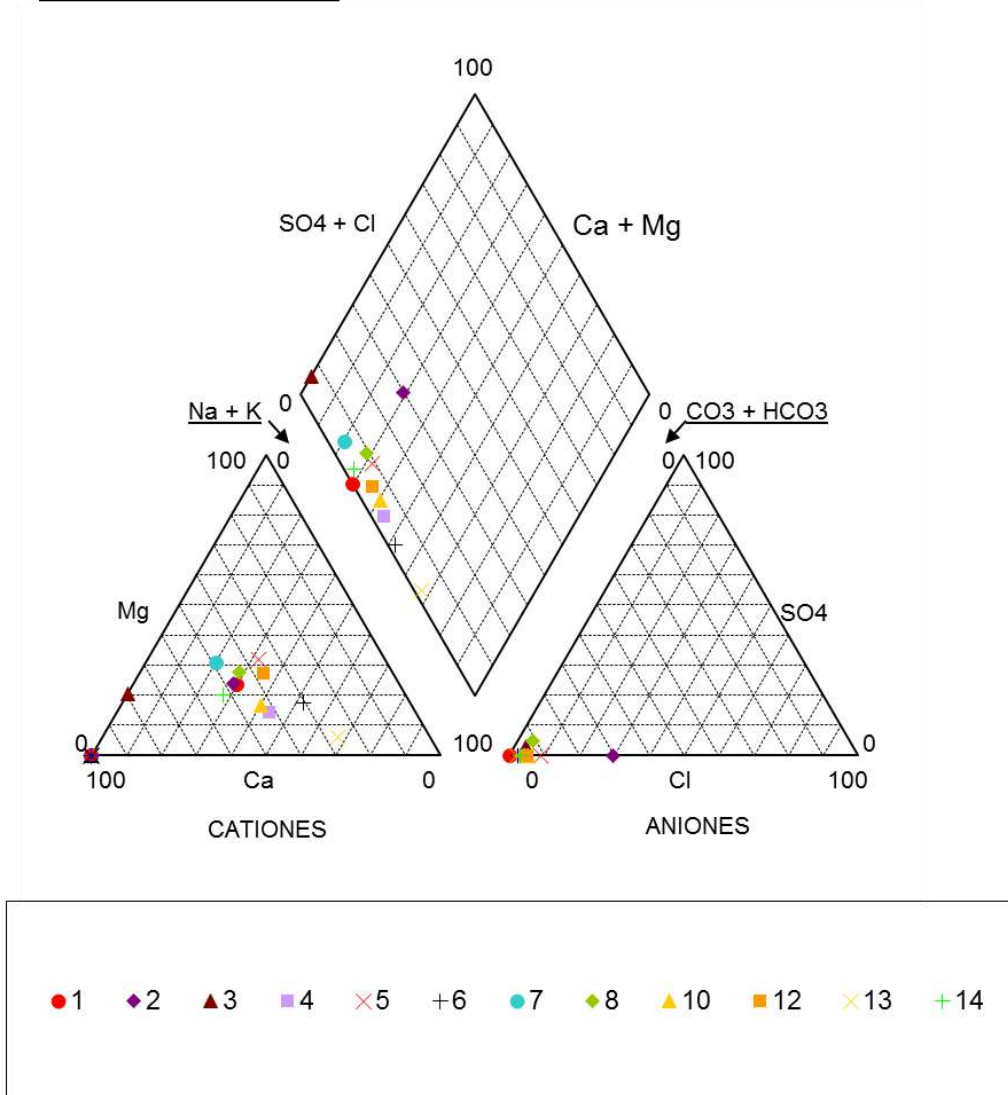
**Gráfico 24.** Diagrama de Piper del muestreo realizado en época seca.

En el gráfico 25 se muestran los resultados del muestreo en época lluviosa donde se pueden observar que la composición química del agua no varía significativamente en comparación con los resultados de los análisis químicos del muestreo realizado en época seca. En época lluviosa todas las muestras se clasifican como tipo aguas bicarbonatadas cálcicas, excepto las muestras No. 6 y No.13 que corresponden con las localidades de La Virgen y Cristo Rey, respectivamente, estas muestras se clasifican como Bicarbonatadas

sódicas. Las muestras No. 2 y No. 3, también se desvían un poco del grupo, aunque igual se clasifican como bicarbonatadas cálcicas.

### DIAGRAMA DE PIPER

Muestreo época lluviosa

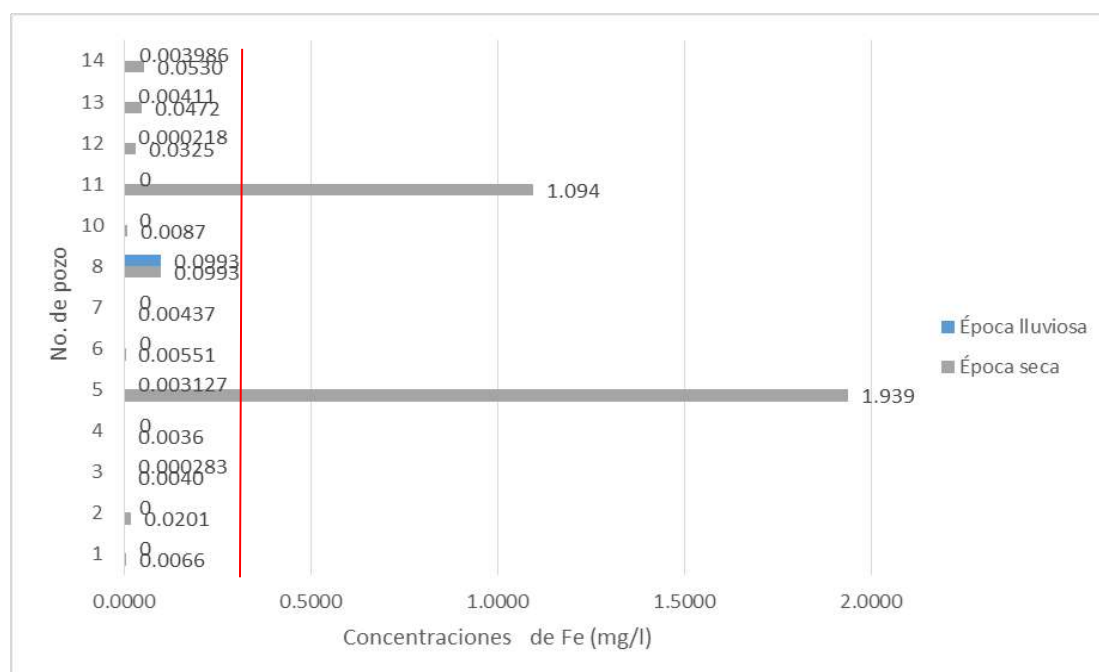


**Gráfico 25.** Diagrama de Piper del muestreo realizado en época lluviosa.

### 4.5.3 Otros elementos

#### 4.5.3.1 Concentración de Fe en el agua subterránea

En el caso del hierro (Fe) el máximo admisible según la norma es de 0,3 mg/L, en el gráfico 26 se observa como en la mayoría de pozos las concentraciones de Fe no supera los 0,099 mg/L y únicamente el pozo No. 5 que corresponde con El Tremedal 2 y el pozo No. 11 que corresponde con Cóbano, presentan concentraciones de 1.939 mg/L y 1,094 mg/L respectivamente. Estos valores fueron registrados en la época seca, en la época lluviosa en ningún pozo se encuentran concentraciones sobre la norma y el valor más alto registrado fue en el pozo No. 8 que corresponde con El Gallito con una concentración de 0.0993 mg/L.

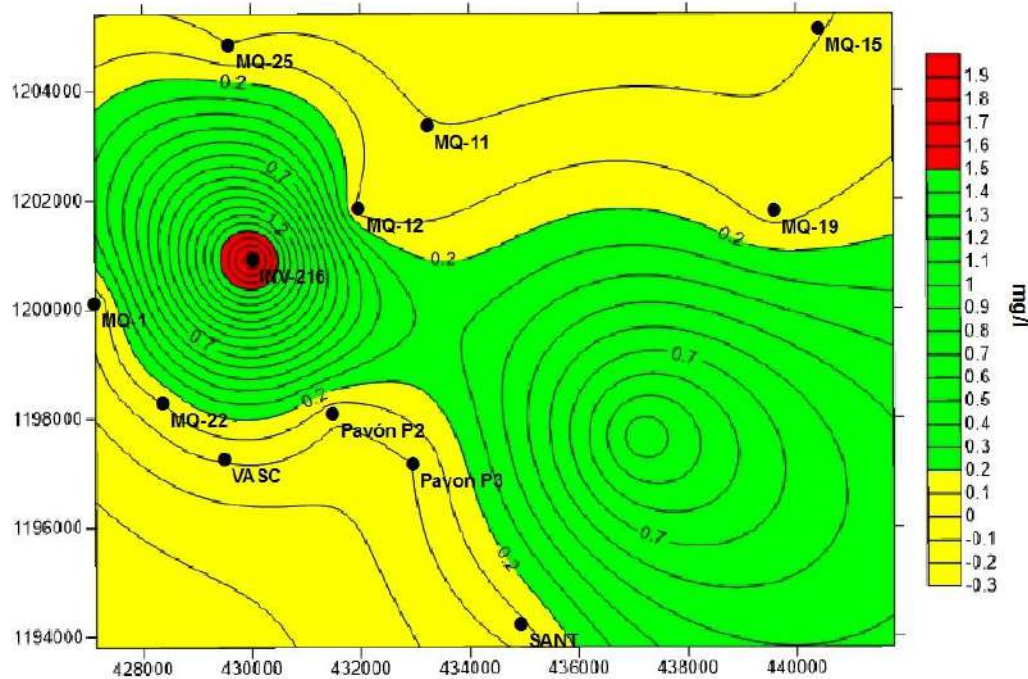


**Gráfico 26.** Concentraciones de hierro (Fe) en los pozos muestreados en la zona del Amparo.

\*La línea roja corresponde con el valor máximo admisible.

Se indica el valor máximo recomendado en el RCAP, siendo 0,3 mg/l de hierro disuelto, donde se evidencia que únicamente en los pozos No. 5 y No. 11 se supera dicho valor límite. Aunque los valores en general se encuentran dentro de los rangos aceptables en el

gráfico 27 se evidencia que las concentraciones son superiores en dirección noroeste-sureste siendo similar a la dirección de la falla inferida. Por lo tanto, se podría suponer que estas concentraciones anómalas están influenciadas por dicha estructura.

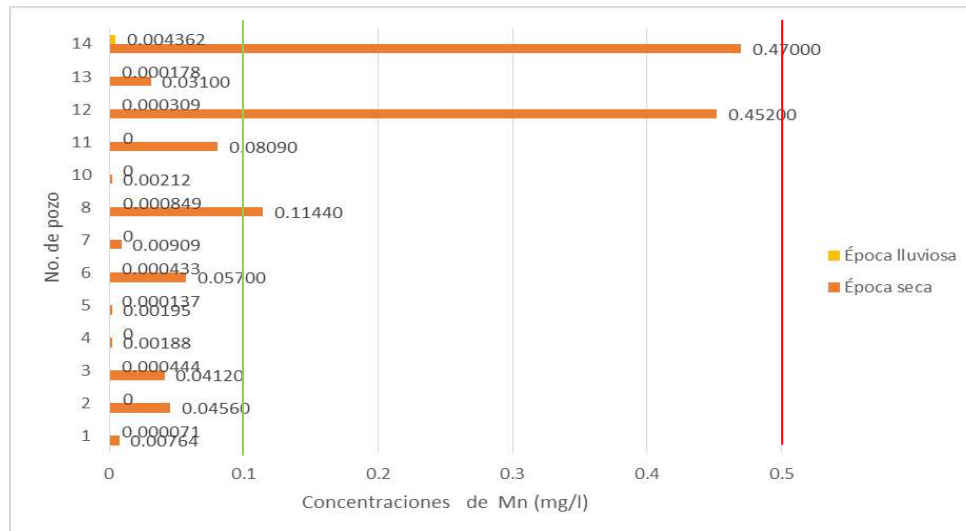


**Gráfico 27.** Concentraciones de hierro (Fe).

#### 4.5.3.2 Concentración de Mn en el agua subterránea

En el caso del manganeso (Mn) la norma establece una concentración recomendada de 0,1 mg/L y una concentración máxima admisible de 0,5 mg/L. En el gráfico 28 se muestran los resultados registrados en las concentraciones, donde se observa que en la época seca los pozos No. 8 que corresponde con El Gallito, el pozo No. 12 que corresponde con Santa Cecilia y el pozo No. 14 que corresponde con Las Nubes, presentan concentraciones de 0,11440 mg/L, 0,45200 mg/L y 0,4700 mg/L respectivamente. Estos valores registrados en la época seca se encuentran sobre el valor recomendado, pero no superan el máximo admisible. Los otros pozos se encuentran por debajo del valor recomendado por lo que los valores se consideran como aceptables.



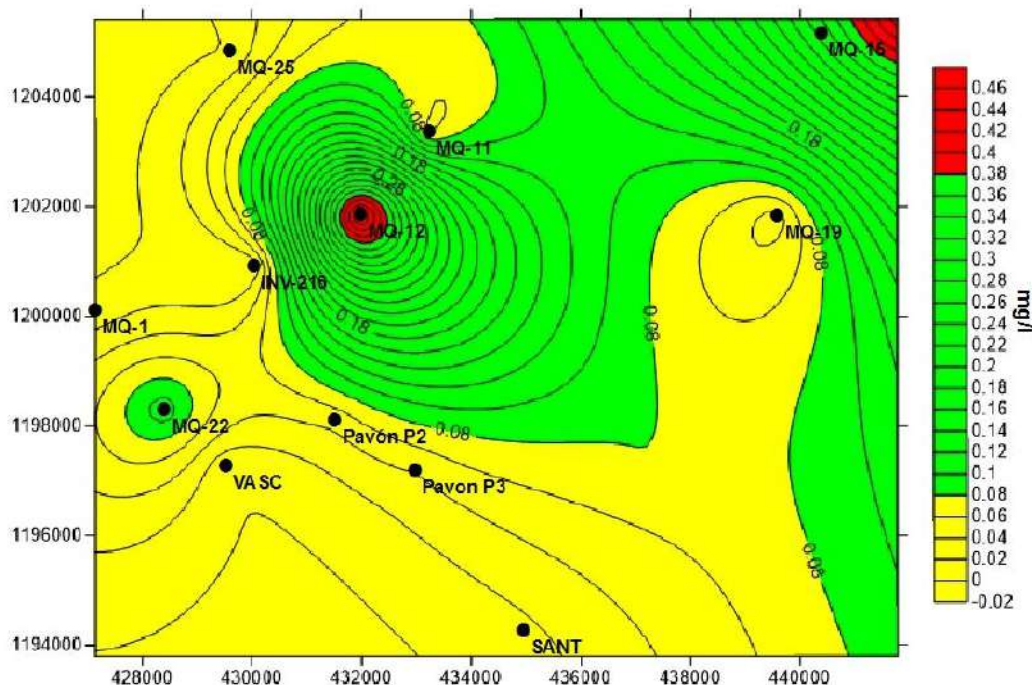


**Gráfico 28.** Concentraciones de manganeso (Mn) en los pozos muestreados en la zona del Amparo.

\*La línea roja corresponde con el valor máximo admisible.

Se definen los valores de 0,1 mg/l de Mn como el valor recomendado y un valor máximo admisible de 0,5 mg/l, según el RCAP. Se evidencia que ningunos de los valores obtenidos en la investigación supera el máximo admisible, sin embargo 3 pozos (No.8, 12 y 14) están por encima del valor recomendado.

En el gráfico 29, se evidencia que las concentraciones de Mn son superiores hacia el noreste, en dirección con el flujo de agua subterránea.



**Gráfico 29.** Concentraciones de manganeso (Mn).

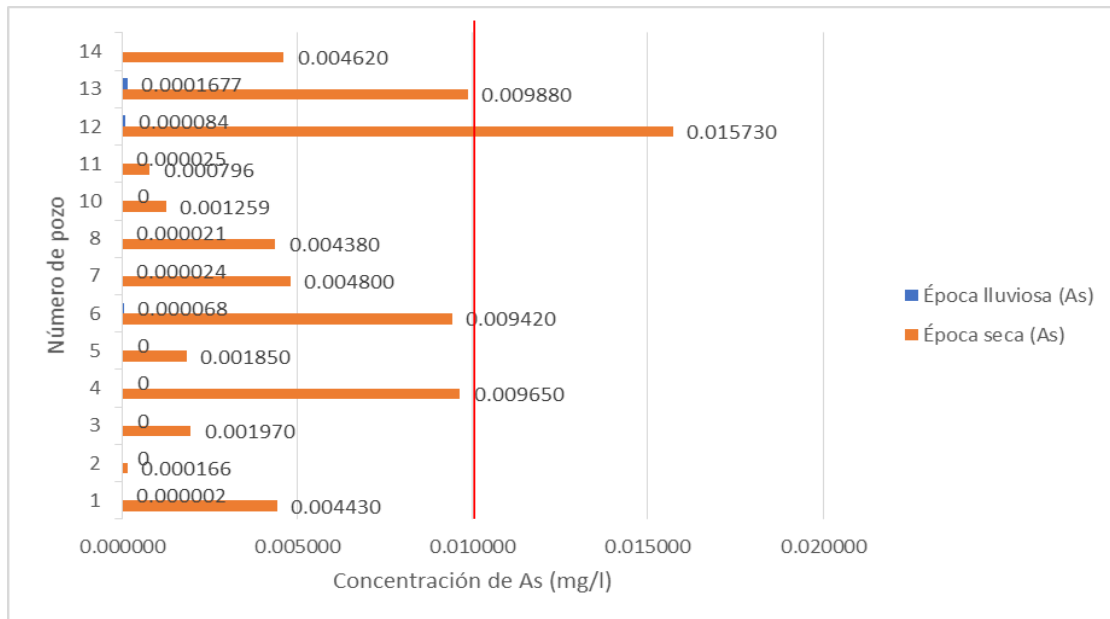
En el caso de la época lluviosa no se registran concentraciones de manganeso, siendo todas las registradas prácticamente 0 mg/L. Esto es un comportamiento anómalo por lo que se considera que hubo errores en el muestreo o más probablemente en el análisis químico.

#### 4.5.3.3 Concentración de As en el agua subterránea

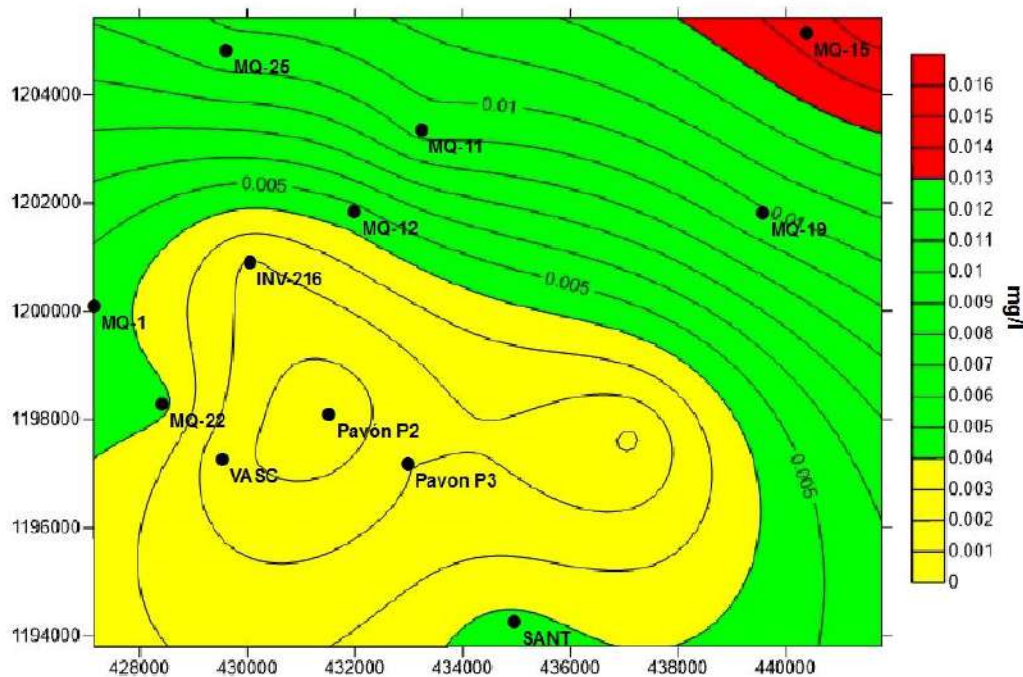
De forma general en el gráfico 30 se observa que las concentraciones de arsénico son mayores que 0,005 mg/L en los pozos 4, 6, 12 y 13, y únicamente el pozo 12 sobrepasa la norma de 0,010 mg/L, sin embargo, el pozo 13 presenta un valor muy cercano a la norma RCAP.

El gráfico 31 se observa que las concentraciones se encuentran cerca de 0,01 en la mayor parte del área de estudio del territorio, específicamente en la parte central y responde a un lineamiento este oeste. Hacia el sur los valores de As son inferiores a 0,004 mg/l y hacia el norte aumentan a valores sobre 0,013 mg/l, esto evidencia que las concentraciones aumentan con el flujo del agua subterránea y que hay una estructura con

dirección este oeste en el centro del sector que favorece el aumento en las concentraciones.



**Gráfico 30.** Concentraciones de arsénico total en los pozos muestreados en la zona del Amparo en la época seca y lluviosa

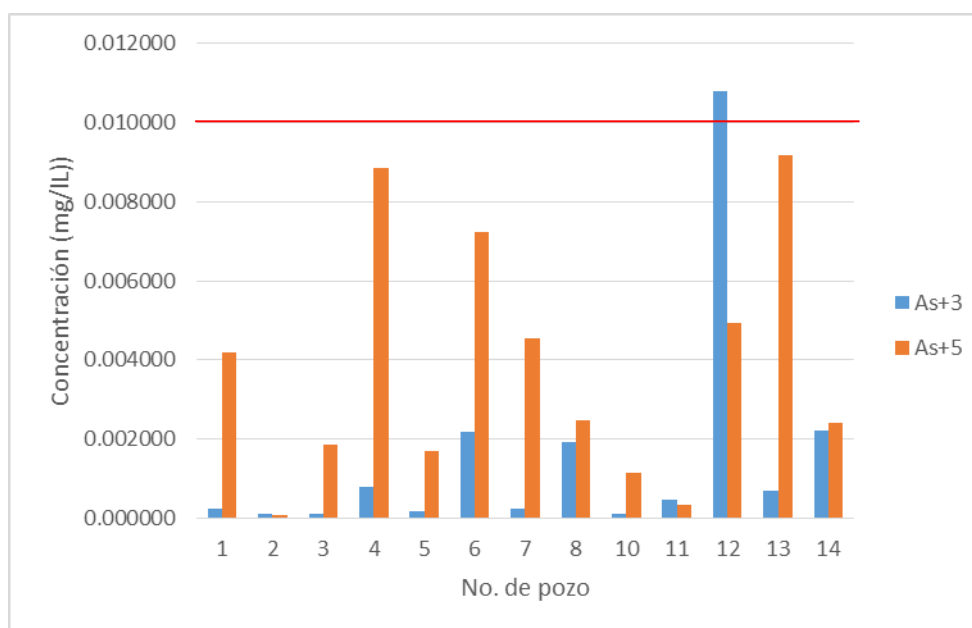


**Gráfico 31.** Concentraciones de arsénico total en los pozos muestreados en la zona del Amparo en la época seca y lluviosa

La norma indica que las concentraciones de arsénico en aguas de consumo humano es 0,01 mg/l o 10 ug/l, por lo tanto, en el muestreo de la época seca únicamente el pozo 12 (Santa Cecilia), están sobre la norma y los pozos 4 (Tremedal 1), 6 (La Virgen) y 13 (Cristo Rey) tienen valores muy cercanos a la norma. Sin embargo, todos los valores se encuentran por debajo del valor máximo admisible.

Los pozos La Virgen, Santa Cecilia y Cristo Rey, se usan para consumo humano, mientras que el pozo del Tremedal 1 no es de uso para consumo humano, su principal uso es agrícola.

En el muestreo realizado en época lluviosa las concentraciones de As bajaron significativamente, donde se pueden redondear todas las concentraciones a 0 mg/L. Las razones que podrían explicar estos resultados es la dilución por el proceso de recarga. Un factor que debe mencionarse es que este muestreo se analizó en otro laboratorio de manera que las diferencias se podrían resultar por esta razón.



**Gráfico 32.** Concentraciones de arsenito y arsenato en los pozos muestreados en la zona del Amparo en época seca.

\*La línea roja corresponde con el valor máximo admisible.

En el gráfico anterior se presenta la relación entre la concentración de arsenito y arsenato para la época seca. Esta correlación evidencia que las concentraciones de arsenato son superiores en la mayoría de pozos, indicando un ambiente anaeróbico.

Se observa que en los pozos 2, 3, 5, 7, 10 y 11 tienen concentraciones bajas de arsenito. Sin embargo en el pozo número 12 donde el arsenito es mayor al arsenato, lo cual podría evidenciar una condición anaeróbica que evite que se oxide a arsenato.

Únicamente el pozo 12 sobrepasa la norma de 10 ug/L (0,01 mg/L) y el resto de pozos no sobrepasan la norma. El orden de los pozos de mayor a menor concentración de arsénico es el siguiente: 12, 13, 4, 6, 7, 1, 14, 8 y 3.

#### 4.5.4 Análisis de concentraciones de Mn, Fe y As

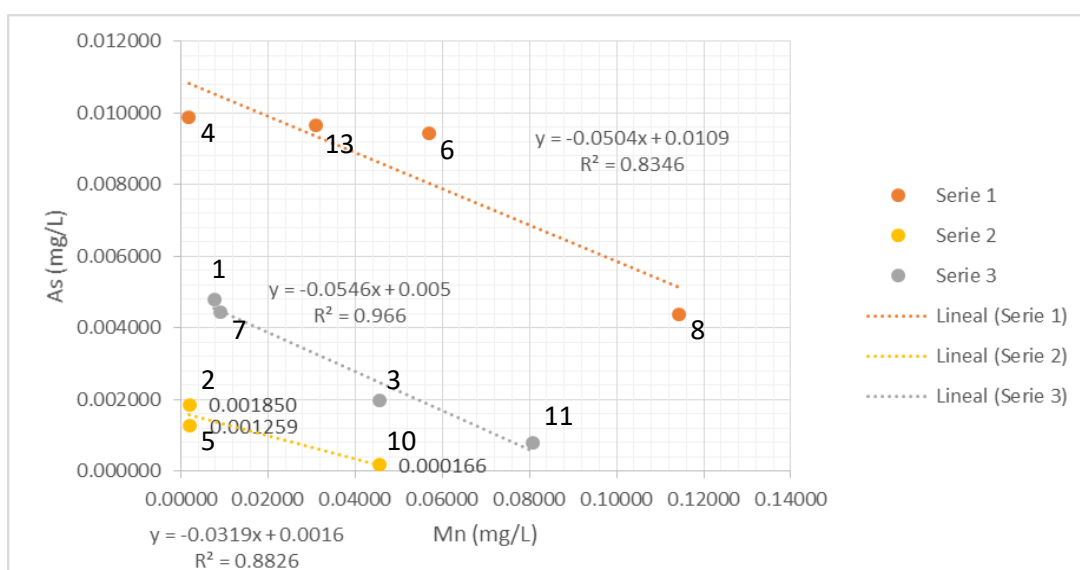
Para efectos del análisis de los elementos de interés y elementos traza en las muestras de agua, se graficaron las concentraciones registradas en los análisis y según las relaciones lineales obtenidas se formaron tres grupos de muestras: las muestras No. 4, No. 6, No. 8 y No. 13 (Serie 1); No. 2, No. 5 y No. 10 (Serie 2); No. 8, No. 1, No. 3 y No. 11 (Serie 3). Para la ubicación geográfica de los puntos de muestreo ver figura 28.

**Cuadro 7.** Series de análisis según el pozo de procedencia.

<b>Serie</b>	<b>Pozo</b>
<b>1</b>	4
	6
	8
	13
<b>2</b>	1
	3
	7
	11
<b>3</b>	2
	5
	10

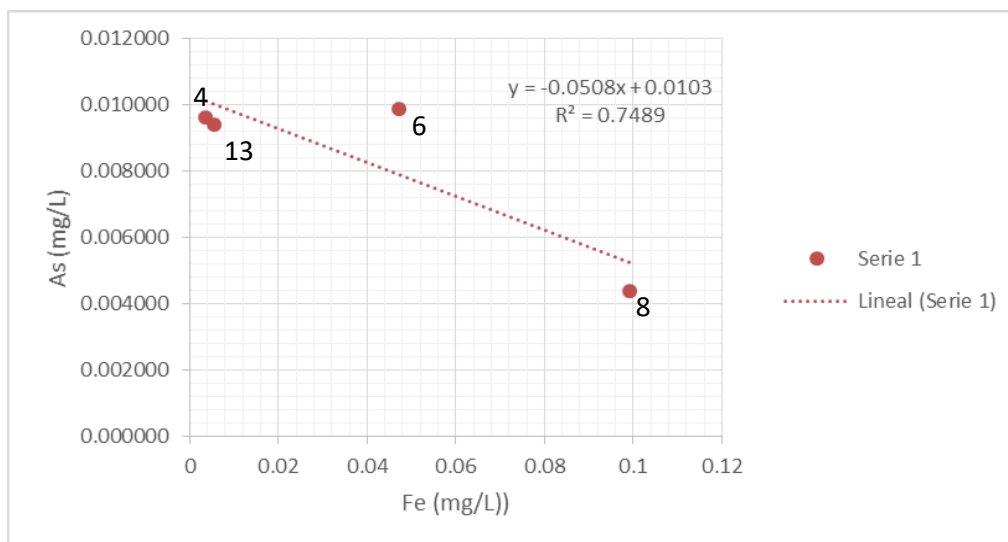
Se formaron tres grupos de muestras: la 4, 6, 8 y 13 (Serie 1); 1, 3, 7 y 11 (Serie 2); 2, 5 y 10 (Serie 3). Donde se observan que todos presentan relaciones lineales y exponenciales evidenciado así correlaciones entre los distintos elementos analizados.

En el gráfico 33, se observa como la tendencia lineal de la concentración de manganeso en función de la concentración de arsénico es decreciente. Evidenciando que conforme aumenta la concentración de Mn, el arsénico disminuye. Esto se puede deber a la formación de óxidos de manganeso que adsorben el arsénico.



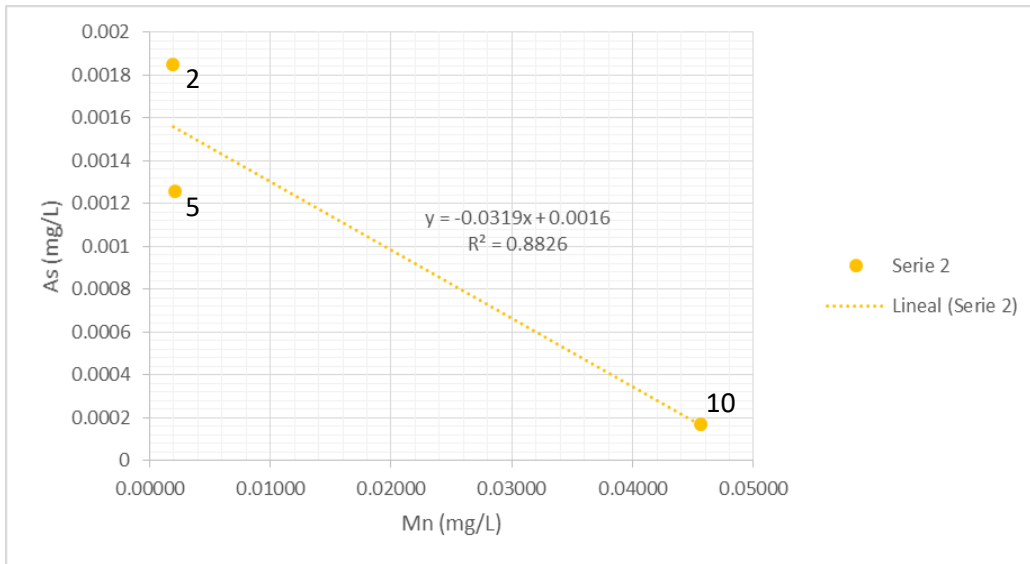
**Gráfico 33.** Concentración de Mn total vs concentración de As total.

En el gráfico 34, se observa una tendencia lineal decreciente en los datos de la serie 1, pero el coeficiente de determinación presenta un valor de 0,7 por lo que se evidencia una tendencia menos lineal que indica que hay variables que afectan este comportamiento. Por lo tanto, no se considera que este comportamiento decreciente sea predecible en todas las condiciones

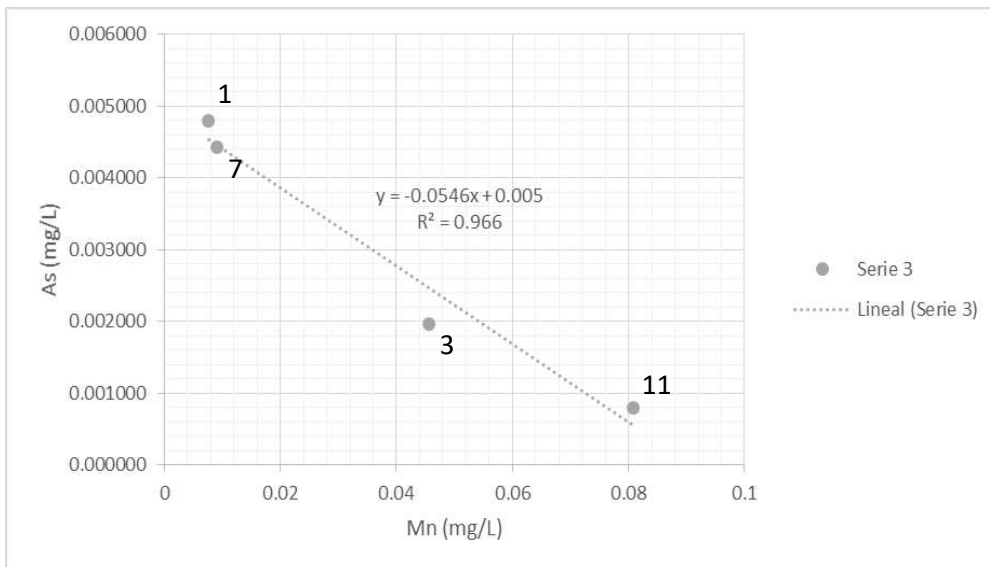


**Gráfico 34.** Relación de la serie 1 según las concentraciones de Fe vs las concentraciones de As.

En el gráfico 35, se observa la misma tendencia decreciente en la serie 2 pero el coeficiente de determinación tiene un valor de 0,8 por lo que se considera una relación más lineal que en la serie 1. Por su parte, en el gráfico 36 la tendencia es línea creciente y el coeficiente de determinación se considera bastante bueno, con un valor de 0,9. Esto confirma que el comportamiento de desorción del As desde los óxidos de Fe podría ser el mecanismo por el cual se libera el As en las aguas que ocurre en la serie 3 (Gráfico 36).

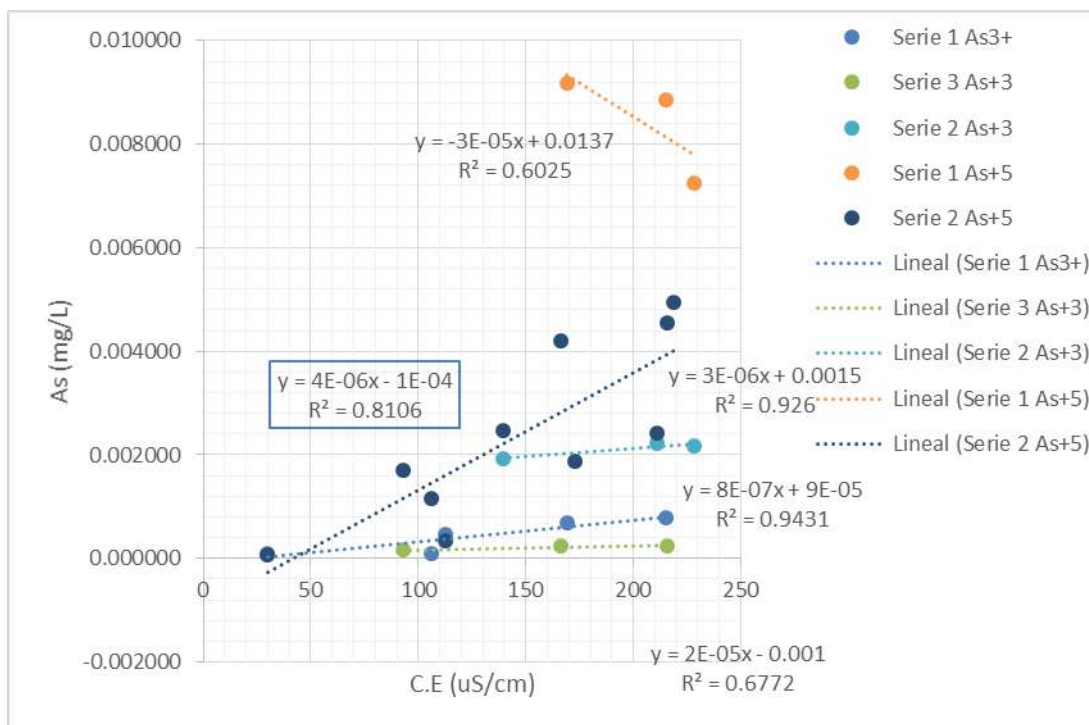


**Gráfico 35.** Relación de la serie 2 según las concentraciones de Fe vs las concentraciones de As.



**Gráfico 36.** Relación de la serie 3 según las concentraciones de Fe vs las concentraciones de As.

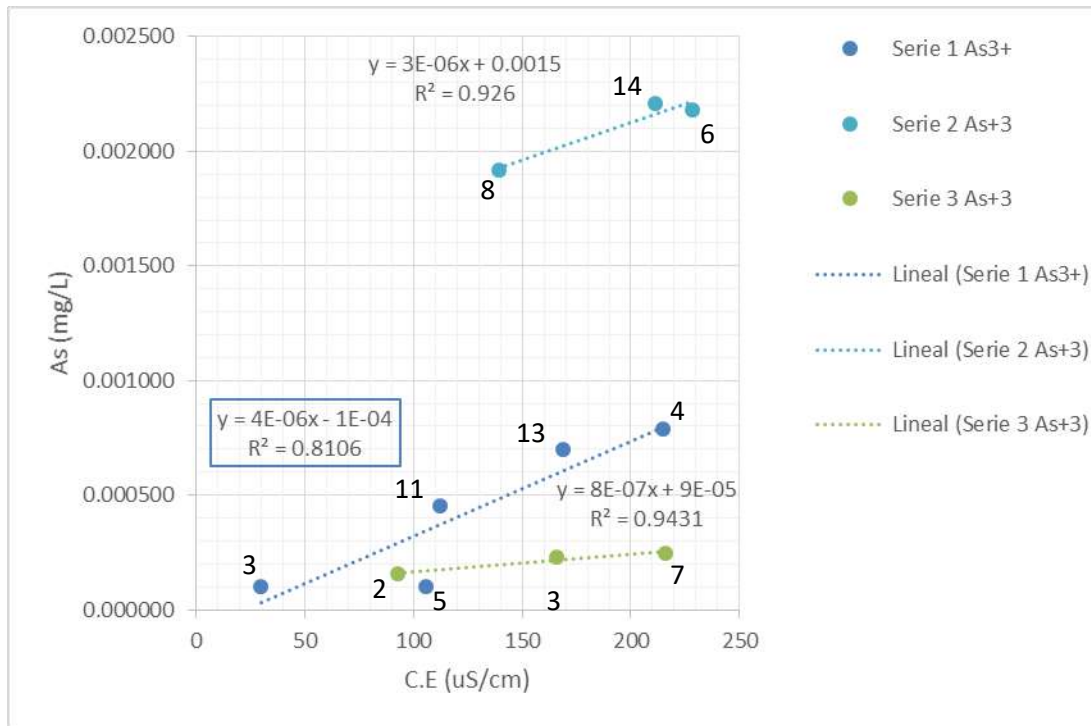




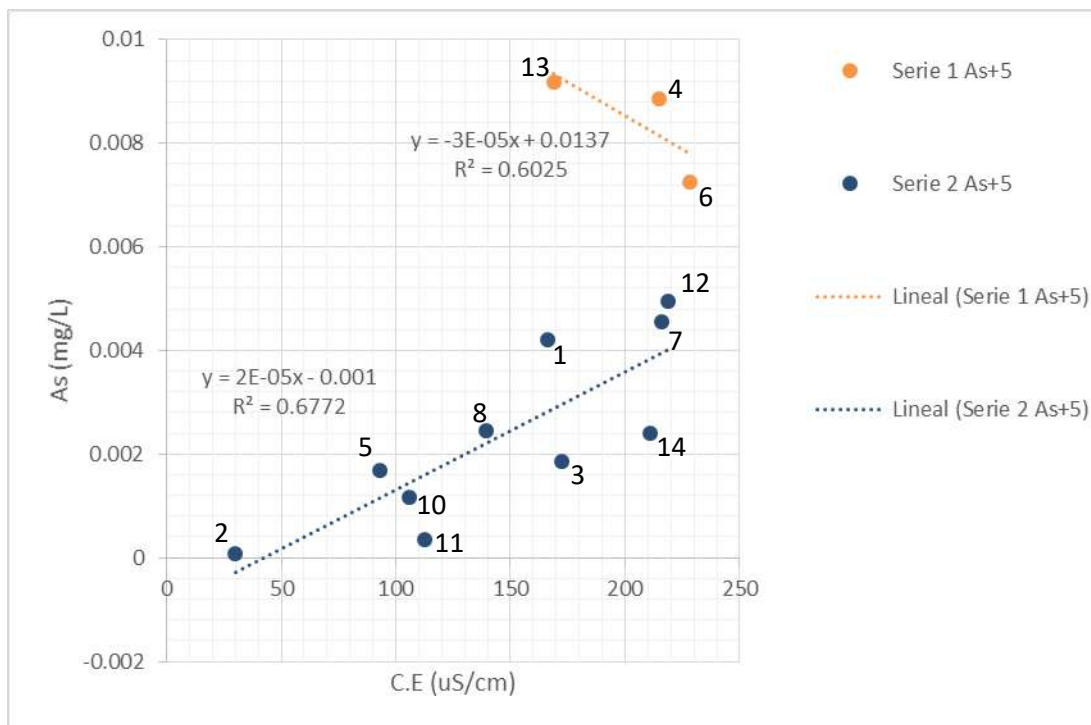
**Gráfico 37.** Relación de C.E vs Especies de As.

En el gráfico 38, se observan 3 series de Arsenito, donde la tendencia es lineal creciente casi paralela y se evidencia que conforme aumenta la conductividad eléctrica aumenta las concentraciones de arsenito. Y el arsenato presenta una tendencia lineal creciente indicando que la conductividad y el arsenato son proporcionales. Mientras que la serie 1 la tendencia es lineal decreciente, lo indica que en esos pozos conforme aumenta la conductividad disminuye el arsenato.

De esta forma se puede identificar que los coeficientes de determinación en las tendencias lineales crecientes del arsenito (Gráfico 38) y de arsenato (Gráfico 39) tienen valores superiores a 0,8 por lo que se considera que la tendencia es buena y la concentración de As aumenta con la conductividad eléctrica. En el caso del arsenato en la serie 1 (Gráfico 34) se determina que la relación no es buena.

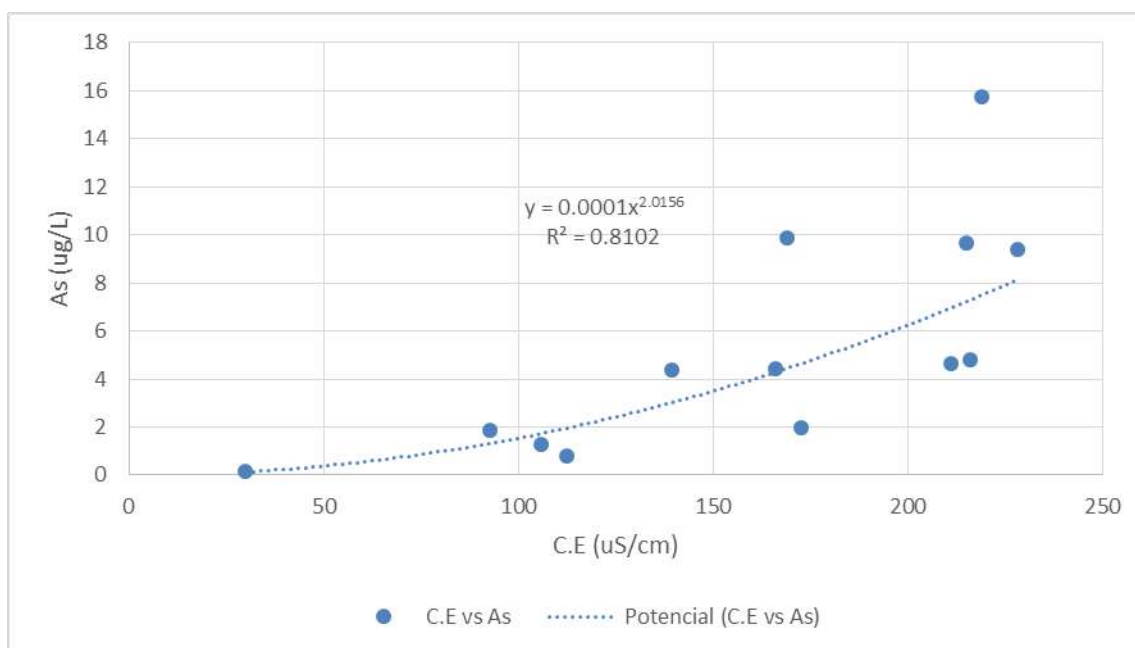


**Gráfico 38.** Relación de C.E vs arsenito.



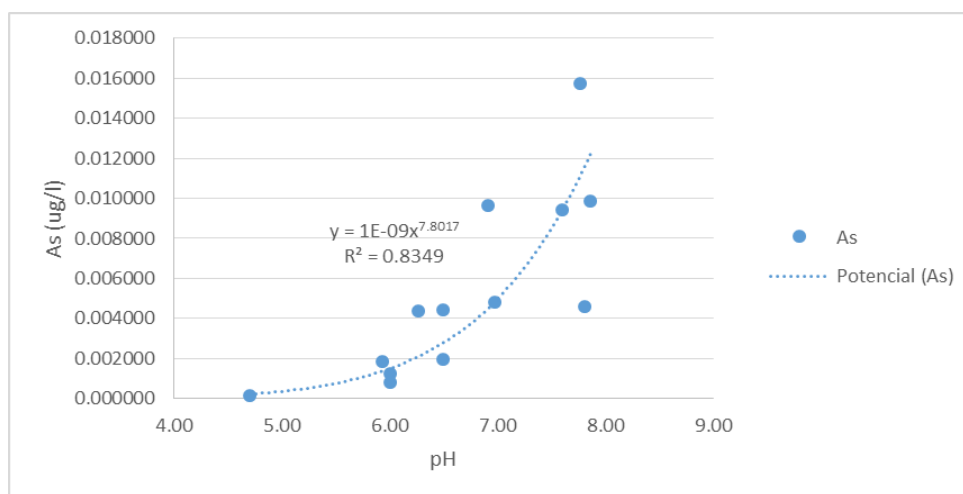
**Gráfico 39.** Relación de C.E vs arsenato.

Según los datos de concentración total de As en todas las muestras, la tendencia es potencial creciente, indicando que las concentraciones de As total son proporcionales a la C.E. Donde se exhibe un coeficiente de determinación de 0,8, lo cual se puede interpretar como resultado del proceso de disolución de minerales.



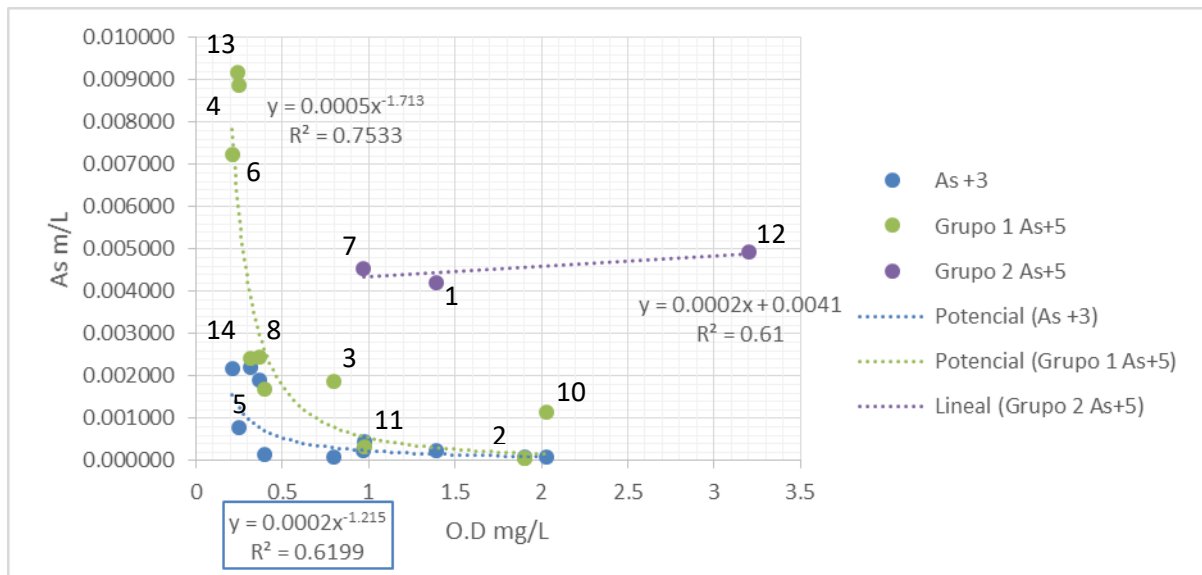
**Gráfico 40.** Relación de C.E vs As total.

En el gráfico 41, se muestra la relación entre el pH y el arsénico total de todas las muestras, y se observa una tendencia potencial evidenciando que el pH aumenta conforme aumenta la concentración de arsénico. Con esta correlación se puede interpretar que las concentraciones menores de As se encuentran en aguas con pH entre 5 y 7, por lo que se consideran aguas neutras a ligeramente básicas, mientras que las concentraciones son mayores entre 7 y 8, o sea aguas neutras a ligeramente básicas.



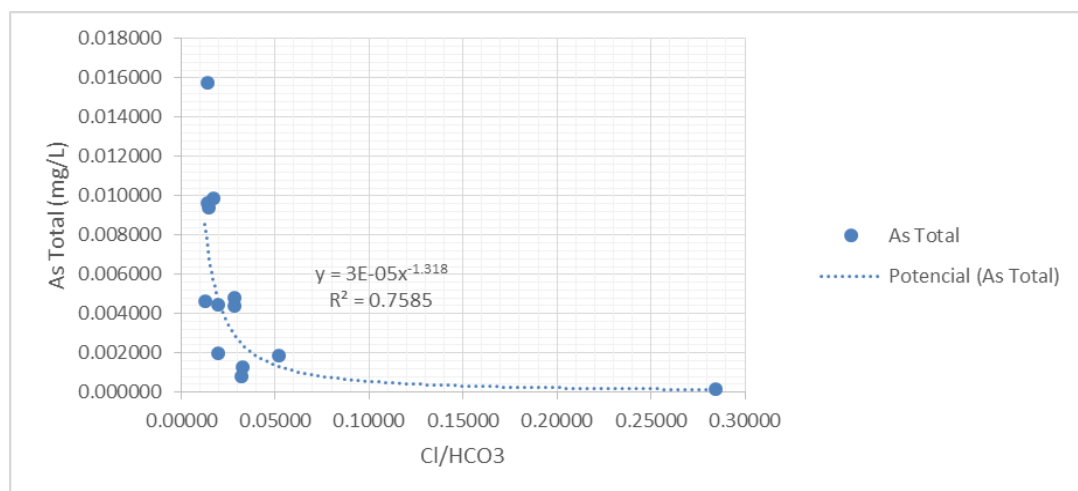
**Gráfico 41.** Relación de pH vs As total.

El gráfico 42, presenta la relación de arsenito en todas las muestras, donde se exhibe una tendencia potencial decreciente indicando que conforme aumenta el oxígeno disuelto disminuye el arsenito; sin embargo, el coeficiente de determinación presenta un valor de 0.6, por lo que no se considera una relación buena. Los mismo sucede con las concentraciones de arsenato, donde se observa que la mayoría de las muestras presentan un comportamiento potencial decreciente, a este grupo se le llamó grupo 1 (Pavón 1 y 2, Gallito, Vasconia, Cobano, Cristo Rey, Santa Cecilia, La Virgen, Tremedal 1 y 2), de igual forma la relación no es buena; y un segundo grupo, grupo 2 (San José, San Antonio, Las Nubes), de arsenato donde más bien se observa un comportamiento lineal creciente. Los valores del coeficiente de determinación de 0,6 indican que las concentraciones de As una correlación directa con la concentración de oxígeno disuelto en el agua. Estos resultados podrían deberse al hecho de que las muestras se tomaron en superficie por ser pozos de extracción, y no se tomaron muestras discretas en donde se pudo minimizar el proceso de oxidación del As durante el muestreo.



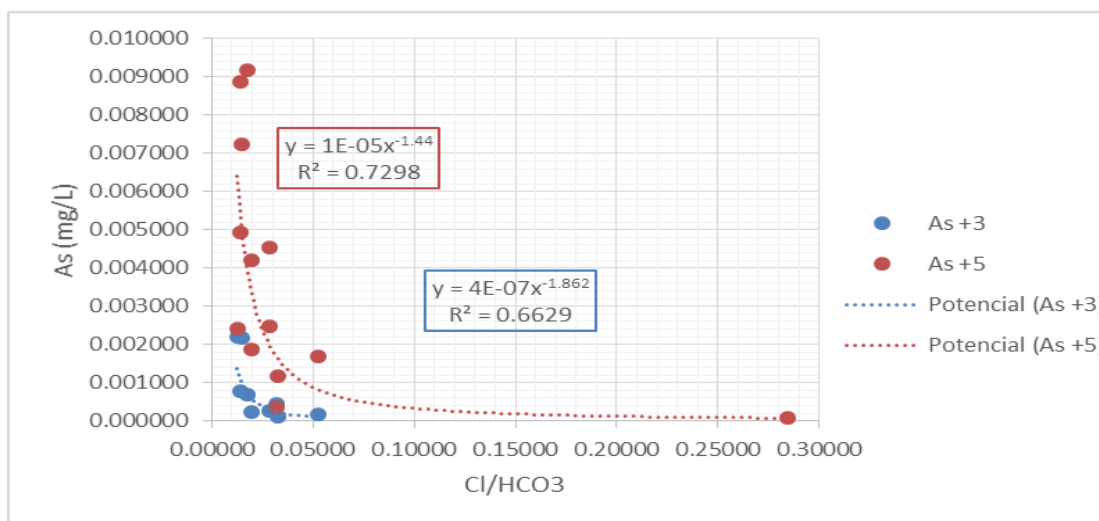
**Gráfico 42.** Relación de O.D vs Especies de As.

En el gráfico 43, la relación de Cl/HCO<sub>3</sub> con las concentraciones de As total se observa una tendencia inversamente proporcional, de la cual se interpreta que conforme aumenta el Cl/HCO<sub>3</sub> disminuye el As. O sea, conforme aumente el HCO<sub>3</sub> hay más arsénico y conforme aumenta el Cl el arsénico disminuye. El coeficiente de determinación tiene un valor de 0,7, además se deben considerar otros factores que influyen en el comportamiento del arsénico; sin embargo, si se puede considerar que esta relación entre el As y Cl/HCO<sub>3</sub> como uno de los fenómenos que le ocurren al As en el agua subterránea.



**Gráfico 43.** Relación de Cl/HCO<sub>3</sub> vs As Total.

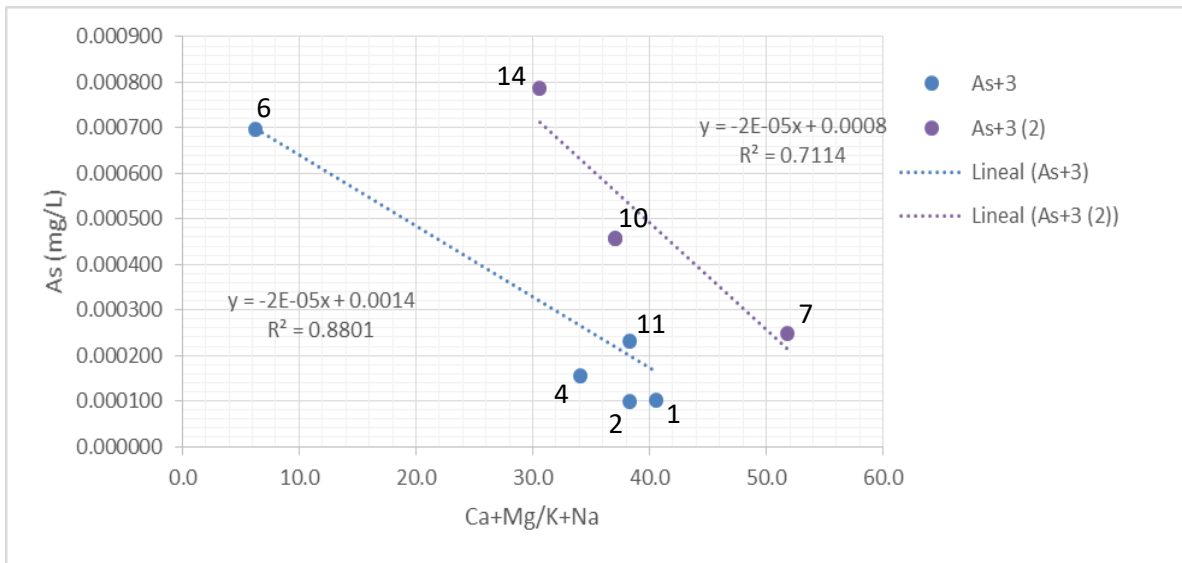
En el gráfico 44, se exhibe la relación entre las especies del arsénico (arsenito y arsenato) y la relación  $\text{Cl}/\text{HCO}_3$ , donde las especies mantienen la misma relación potencial inversamente proporcional.



**Gráfico 44.** Relación de  $\text{Cl}/\text{HCO}_3$  vs. Especies de As.

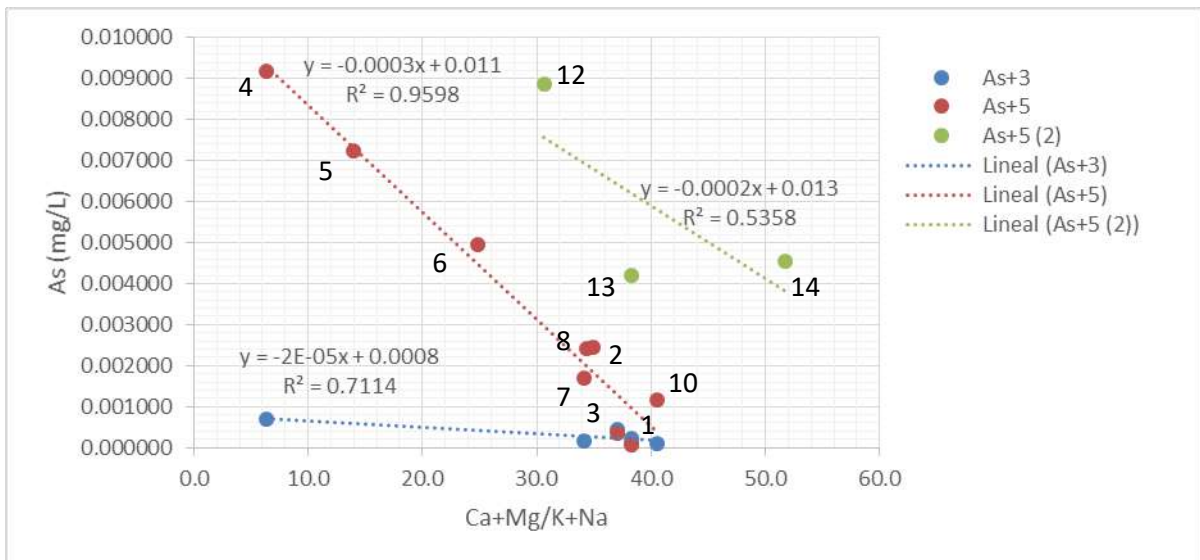
En el gráfico 45, se muestran las concentraciones de arsenito en relación a la razón  $\text{Ca} + \text{Mg}/\text{K} + \text{Na}$ . Se observa una tendencia lineal inversamente proporcional donde se observa que el arsenito disminuye conforme aumenta las concentraciones de  $\text{Ca}$  y  $\text{Mg}$  y aumenta conforma aumentan las concentraciones el  $\text{K}$  y  $\text{Na}$ .

En esta relación se obtiene un coeficiente de determinación de 0,88 y 0,7, por lo que se considera como una buena correlación.



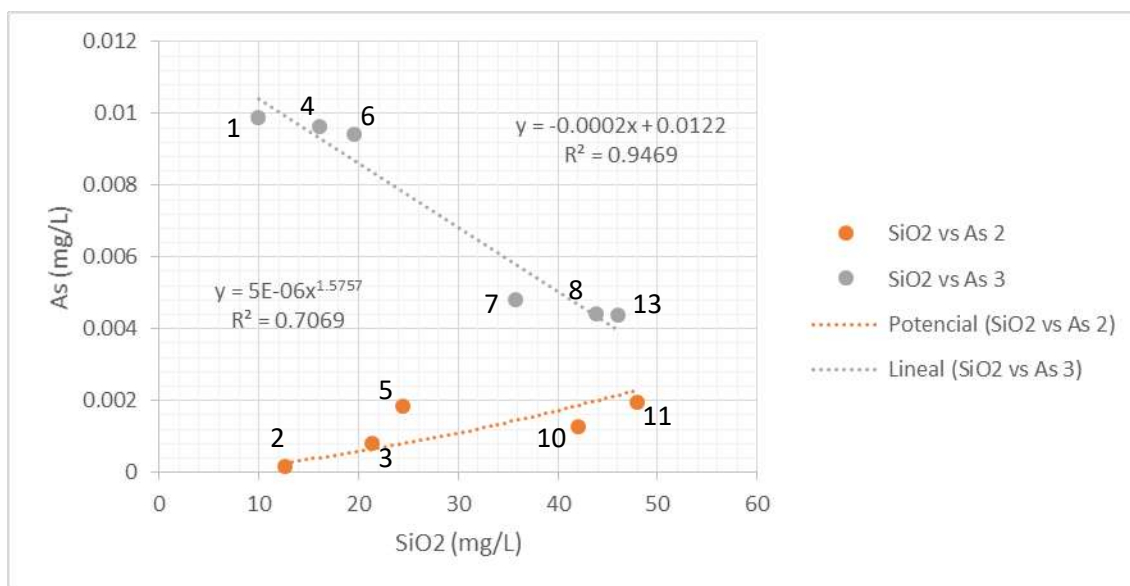
**Gráfico 45.** Relación de Ca+Mg/K+Na vs Arsenito.

La tendencia general en el caso de arsenato vs Ca+Mg/K+Na (gráfico 46) es línea inversamente proporcional, al igual que el arsenito. Sin embargo, la relación del arsenato es variable, en el grupo 1 (Pavón 1 y 2, Gallito, Vasconia, Cobano, Cristo Rey, Santa Cecilia, La Virgen, Tremedal 1 y 2) el coeficiente de determinación es de 0,9; mientras que, en el grupo 2 (San José, San Antonio, Las Nubes) la relación es de 0,5.



**Gráfico 46.** Relación de Ca+Mg/K+Na vs Arsenato.

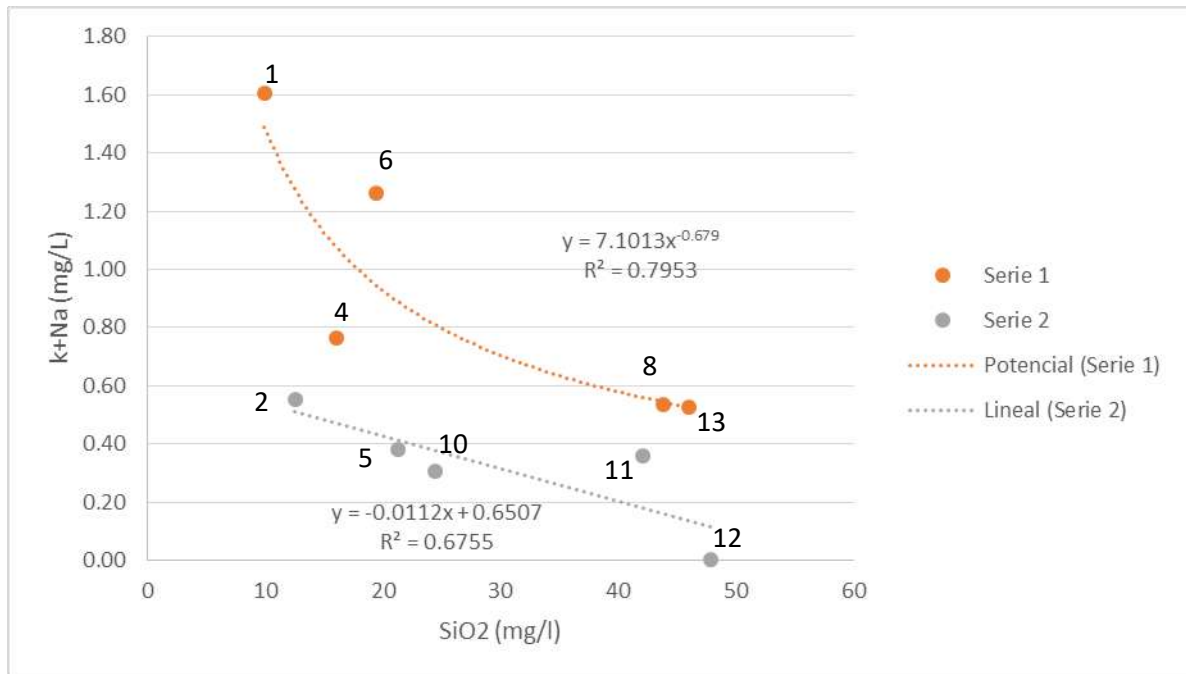
En el gráfico 47, se presenta la relación  $\text{SiO}_2$  versus As donde se observa una tendencia potencial entre las muestras 2, 3, 5, 10 y 11, conforme aumenta el  $\text{SiO}_2$  aumenta el As. Lo que podría evidenciar que en estas muestras conforme aumenta el  $\text{SiO}_2$  disminuye el As. En cambio, para las muestras 1, 4, 6, 7, 8 y 13, se observa una tendencia lineal entre las muestras, donde se evidencia que en estas muestras conforme aumenta el  $\text{SiO}_2$  disminuye el As.



**Gráfico 47.** Relación  $\text{SiO}_2$  vs As.

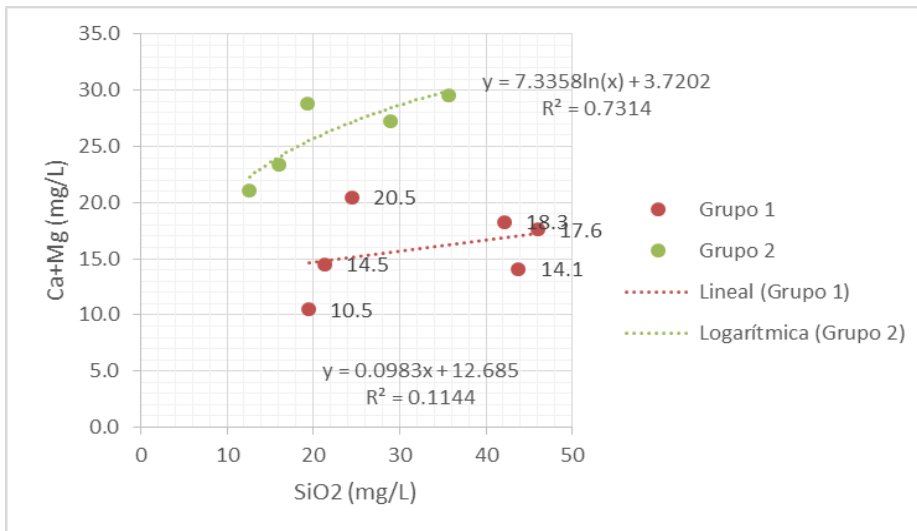
En el gráfico 48, se exhiben las relaciones del sílice con el potasio (K) y el sodio (Na), en donde la serie 1 (1, 4, 6, 7, 8 y 13) y la serie 2 (2, 5, 10, 11 y 12) muestran una tendencia decreciente evidenciando que conforme aumenta el sílice en disolución decrece el potasio y el sodio. Sin embargo el coeficiente de determinación no es bueno por lo que no se considera como una tendencia definitiva.





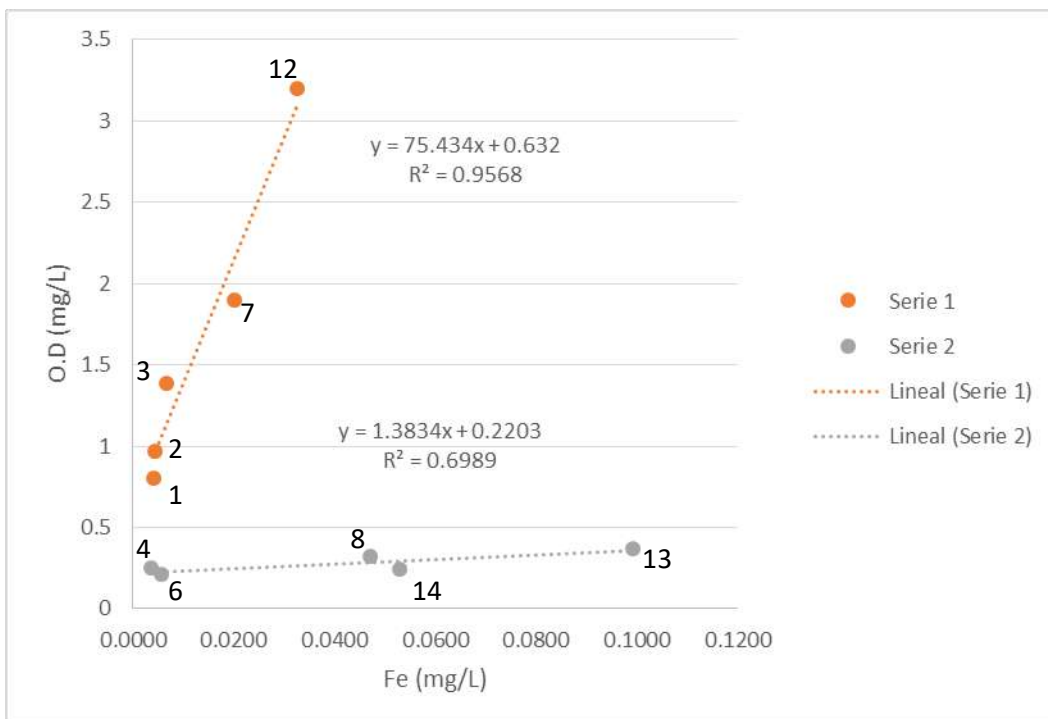
**Gráfico 48.** Relación  $\text{SiO}_2$  vs  $\text{K}+\text{Na}$ .

En el gráfico 49, se exhiben las relaciones del sílice con el calcio (Ca) y el magnesio (Mg), en donde la serie 1 (3, 4, 7, 12, 13 y 14) y la serie 2 (2, 5, 10, 11 y 12) muestran una tendencia creciente evidenciando que conforme aumenta el sílice en disolución aumenta el potasio y el sodio en disolución, probablemente como producto de la descomposición de arcillas. Sin embargo el coeficiente de determinación no es bueno para la serie uno y tiene un valor mayor para la serie dos, por lo tanto se considera que el comportamiento de estos iones de sílice están controlados por más variables que las concentraciones de calcio y magnesio.



**Gráfico 49.** Relación  $\text{SiO}_2$  vs  $\text{Ca}+\text{Mg}$ .

En el gráfico 50, se observa una relación entre el oxígeno disuelto y el hierro en disolución, donde es evidente que conforme aumenta la concentración de oxígeno disuelto en el agua subterránea también aumenta la concentración de hierro en disolución.



**Gráfico 50.** Relación  $\text{Fe}$  total vs  $\text{O.D.}$

#### 4.5.5 Análisis de concentraciones en perfiles

Se elaboraron 2 perfiles (figura 28), uno en dirección noroeste, los cuales se identifica como Perfil 1 (Pozos No, 7, 11,13 y 12) y uno en dirección noreste, más específicamente el perfil 2 (Pozos No. 7, 3, 2, 5,14, 6 y 4).

Se presenta el cuadro 8, con los datos de las localidades, pozos, y distancias de los perfiles.

**Cuadro 8.** Identificación de los pozos y localidades según perfil.

PERFIL	Localidad	No. pozo	Distancia (m)
<b>SECTOR NOROESTE</b>			
Perfil 1	San Antonio	7	0
	Pavón 2	3	3884
	Pavón 3	2	5601
	El Tremedal 1	5	8789
	Santa Cecilia	14	11040
	Tremedal	4	13314
	La Virgen	6	17216
<b>SECTOR NORESTE</b>			
Perfil 2	San Antonio	7	0
	Finca Eco	11	4525
	Cristo Rey	13	9372
	Las nubes	12	13591

El flujo subterráneo en la zona es en dirección N, con componente NW en algunas zonas, como se aprecia en el capítulo de hidrogeología.

A continuación se presentan los resultados de concentración a lo largo de los perfiles seleccionados para el muestreo de verano.

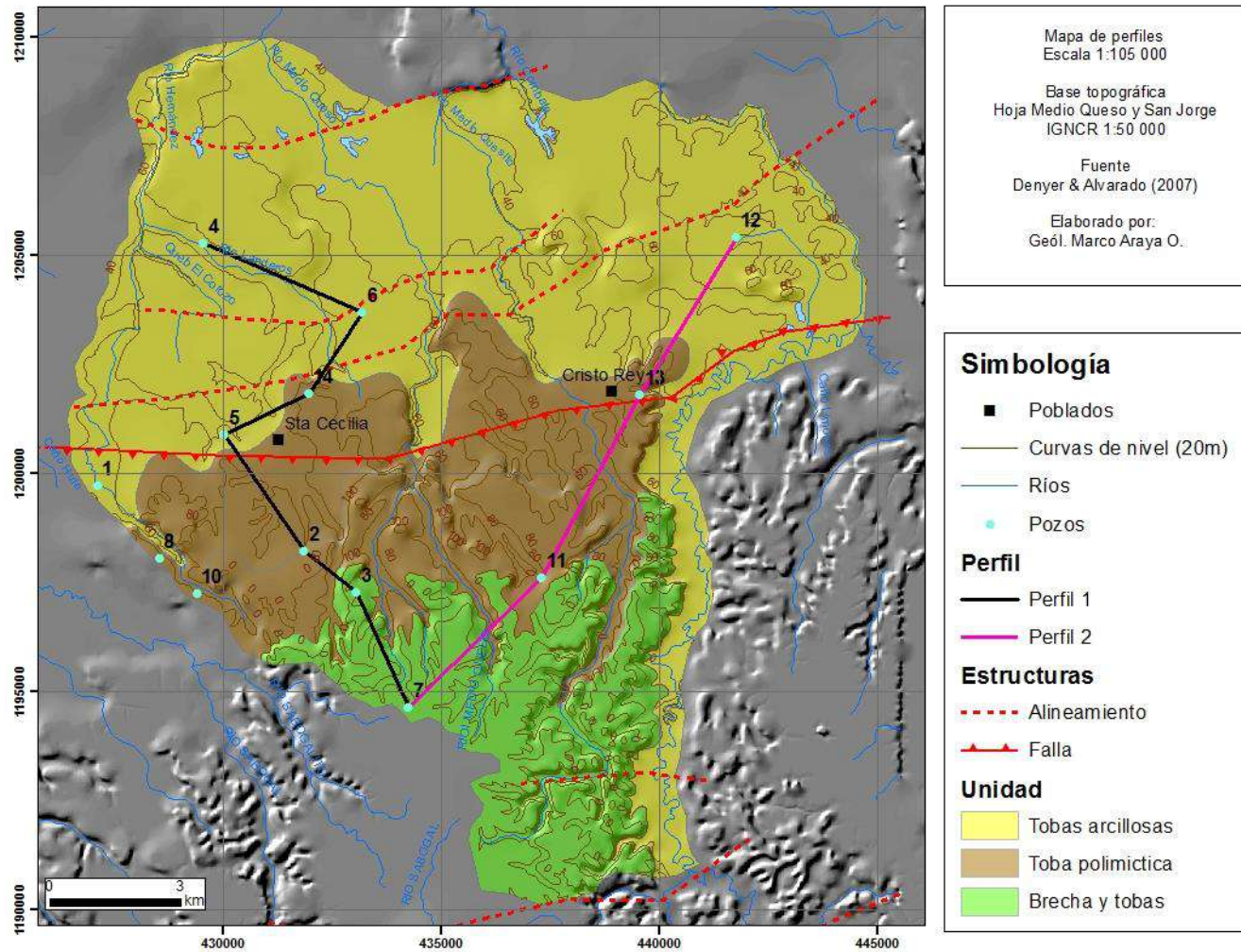
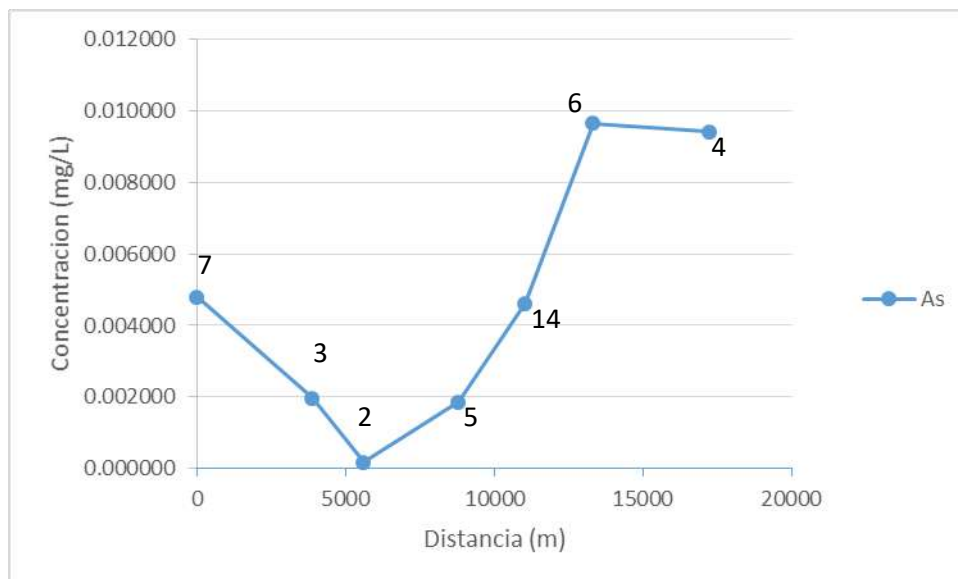


Figura 30. Distribución de los perfiles y pozos en el área de estudio

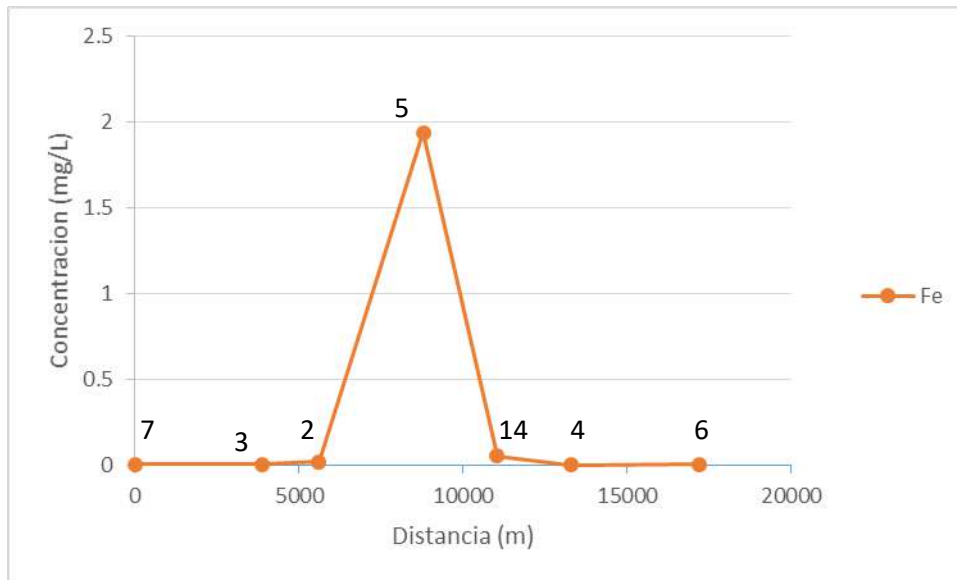
#### 4.5.5.1 PERFIL 1

Se observa que en este perfil compuesto por los pozos No. 7, No. 3, No. 2, No. 5 y No. 4, se exhibe una relación con una tendencia cóncava donde la concentración de As tiene un punto mínimo en el pozo 2 y después aumenta con el flujo hasta un valor máximo en el pozo 4.



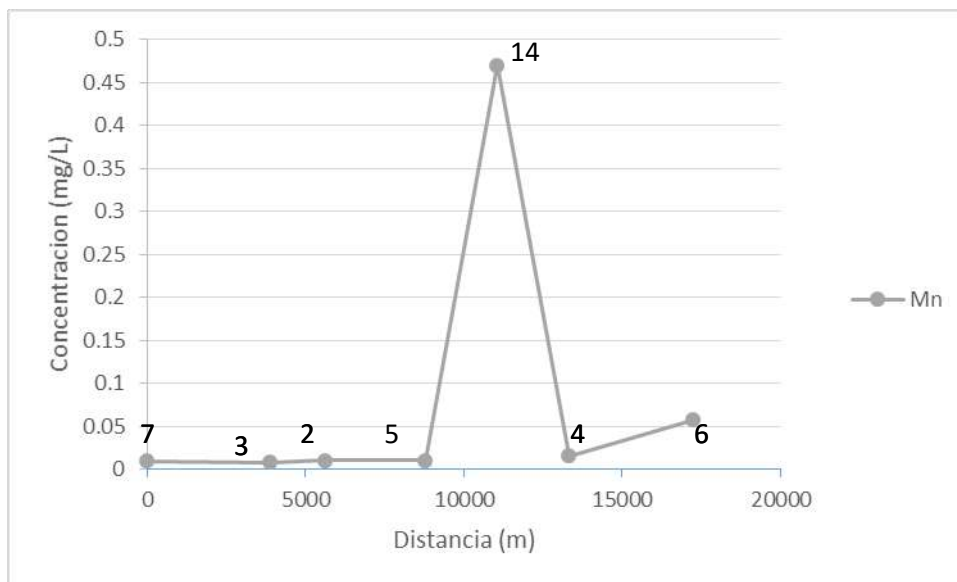
**Gráfico 51.** Perfil de las variaciones de arsénico a lo largo del flujo.

En el gráfico 52, se observa como el valor de la concentración de hierro tiene un valor anómalo en el pozo No. 5, este valor no se considera representativo debido a las condiciones del pozo que fue muestreado, donde no se pudo purgar de manera satisfactoria dicho pozo y además no era utilizado en un periodo de tiempo extenso. En este gráfico se exhibe una tendencia donde se presenta un aumento considerable en la concentración de hierro en el pozo No. 2. Esto es coincidente con los puntos donde aumenta la concentración de As en disolución y de igual forma la concentración de Fe, por lo tanto, se puede interpretar que los óxidos de hierro se están disolviendo y liberando el As que se encontraba adsorbido por dichos óxidos.



**Gráfico 52.** Perfil de las variaciones de hierro a lo largo del flujo.

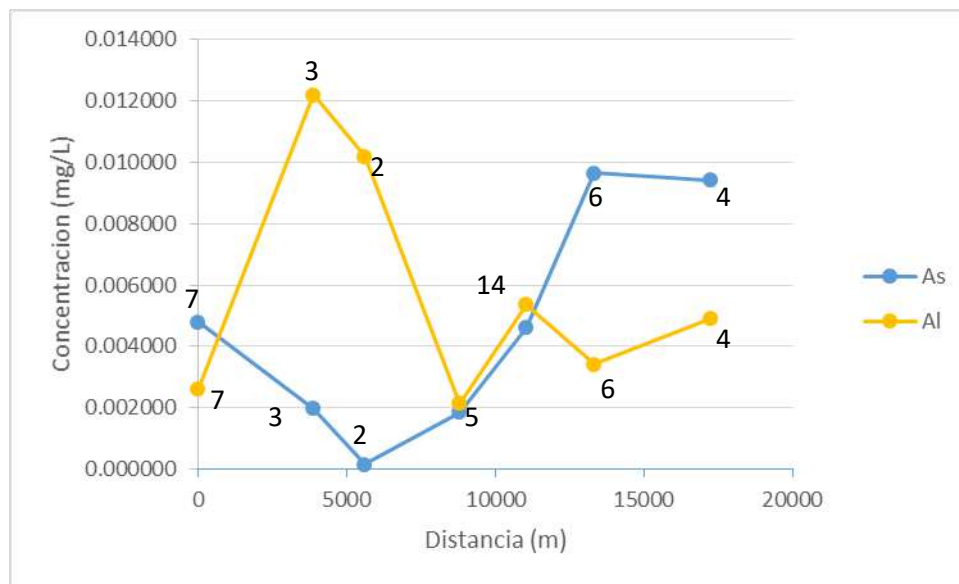
En el gráfico 53, se observa como las concentraciones de Mn aumentan hacia el norte, esto además coincide con el aumento en las concentraciones de As indicando que la disolución de óxidos de Mn genera así más iones de manganeso en disolución y provocando la desorción del As, causando el aumento en la concentración del mismo.



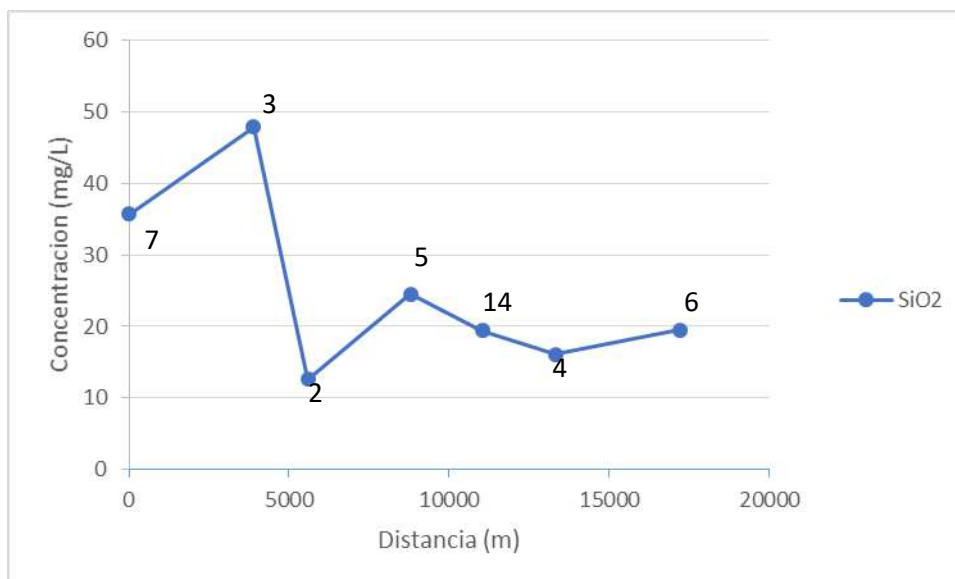
**Gráfico 53.** Perfil de las variaciones de manganeso a lo largo del flujo.

La relación de las concentraciones de arsénico y aluminio (gráfico 54) muestra una tendencia inversamente proporcional conforme aumentan las concentraciones de aluminio

(Al) en disolución menores son las concentraciones de arsénico y cuando las concentraciones de aluminio en disolución disminuyen, las concentraciones de arsénico aumentan. Esto se puede deber al proceso de adsorción desorción, debido a las cargas de los iones. Las arcillas con principalmente aluminosilicatos, el aluminio es un ion con carga positiva y el arsénico también tiene carga positiva, al ser adsorbido por la arcilla se reemplaza el aluminio con el arsénico por lo tanto se libera el ion de aluminio. Por esta razón cuando hay aluminio disolución el arsénico disminuye; por otro lado, cuando hay desorción del arsénico ocurre lo contrario, disminuye el aluminio en disolución y aumenta el arsénico. Sin embargo, se deben realizar otros análisis para determinar la causa de esta adsorción y desorción, y la tasa a la que ocurre este proceso.



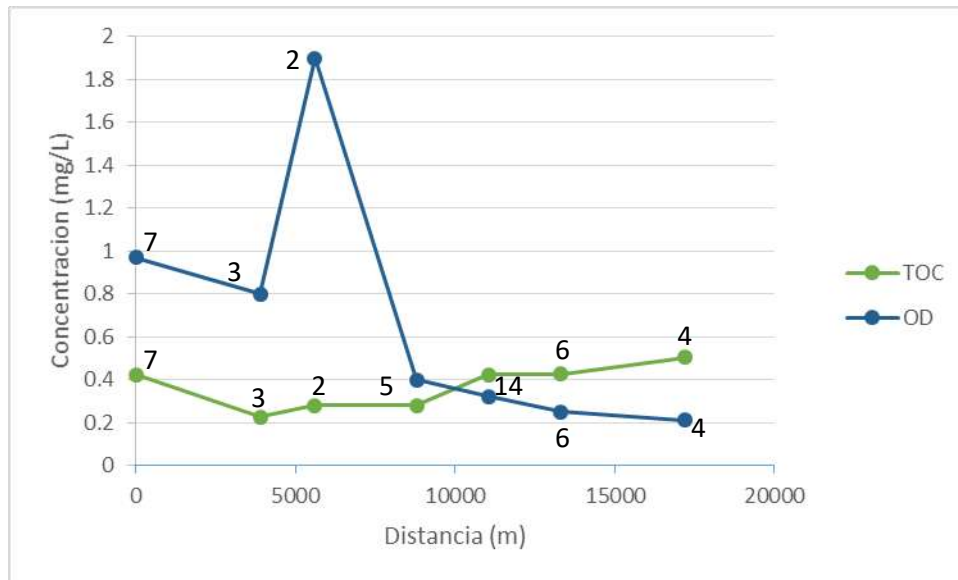
**Gráfico 54.** Perfil de las variaciones de arsénico y aluminio a lo largo del flujo.



**Gráfico 55.** Perfil de las variaciones de sílice a lo largo del flujo.

En el gráfico 56, se observa la relación de oxígeno disuelto, la cual tiene una tendencia proporcional en los primeros pozos donde conforme disminuye el O.D. disminuye el As, en el siguiente pozo el O.D. tiene un valor máximo y el As tiene un valor máximo. Por lo tanto, se podría asociar un comportamiento similar en el aumento y disminución de la concentración de As y el T.O.C. La razón de este comportamiento se puede explicar de la siguiente manera, cuando tenemos poco oxígeno en disolución se está dando la oxidación de compuestos los cuales tienen propiedades de adsorción de iones, de forma inversa cuando tenemos oxígeno disuelto no hay oxidación de compuestos y por esa razón el oxígeno está disponible en la disolución. Por lo tanto, el comportamiento es coincidente entre el T.O.C. y el As; conforme disminuye el oxígeno en disolución hay más formación de óxidos que adsorben el arsénico en disolución, y cuando hay menos oxidación y por lo tanto más oxígeno en disolución se presentan concentraciones de As mayores.

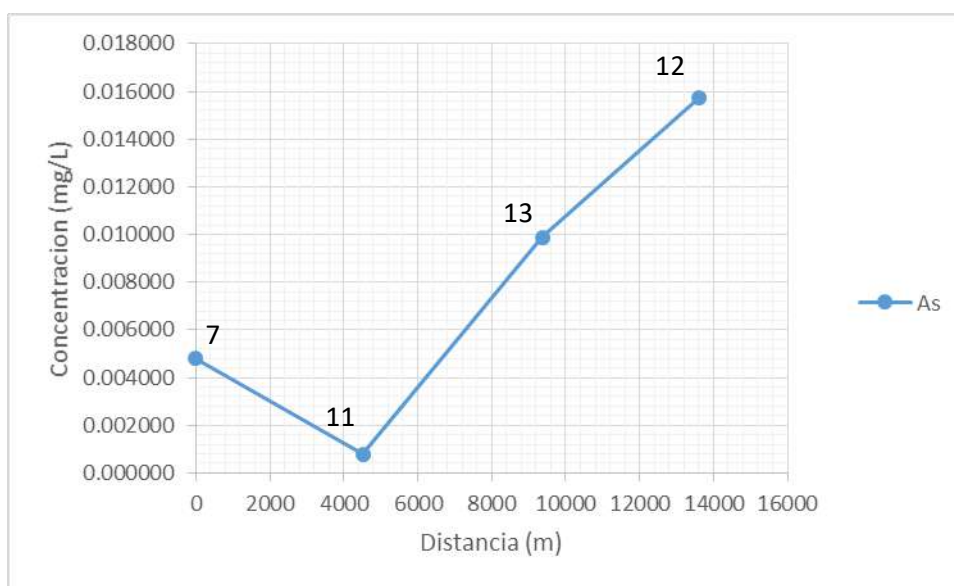




**Gráfico 56.** Perfil de las variaciones de oxígeno disuelto y carbono orgánico a lo largo del flujo.

#### 4.5.5.2 PERFIL 2

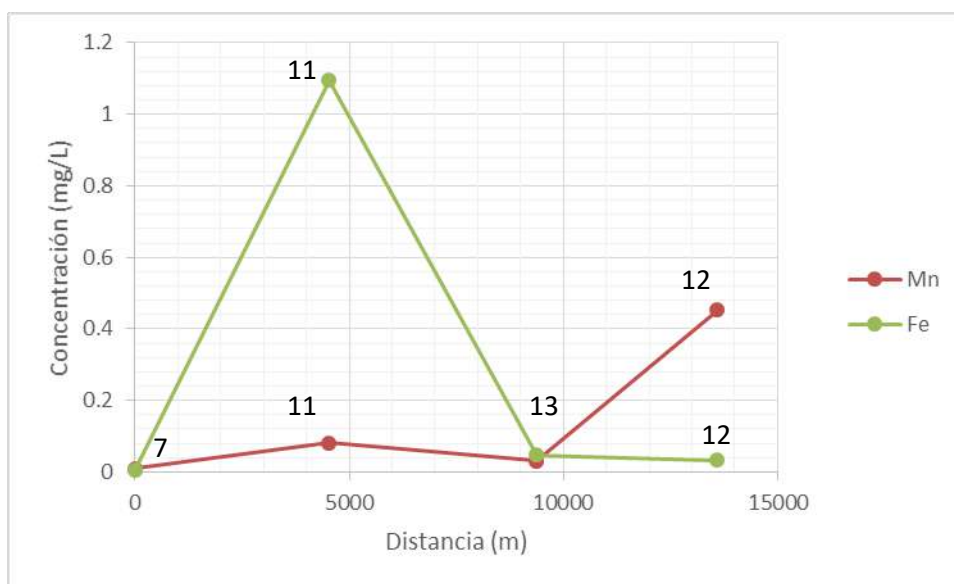
Se observa que en este perfil compuesto por los pozos No. 7, No. 11, No. 13 y No. 12, se exhibe una relación con una tendencia decreciente del pozo No. 7 al No. 11, donde la concentración de As tiene un punto mínimo en el pozo 11. Después aumenta con el flujo hasta un valor máximo en el pozo 12.



**Gráfico 57.** Perfil de las variaciones de arsénico a lo largo del flujo.

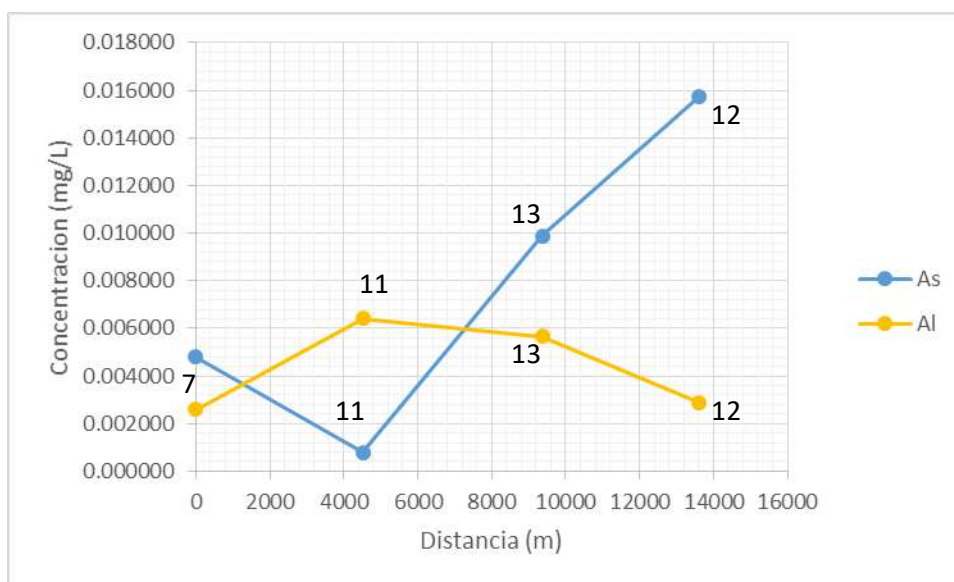
En el gráfico 58, se observan la variación en las concentraciones de Fe a lo largo del perfil con una tendencia ascendente entre los pozos No. 7 y No. 11, y posteriormente disminuye conforme se avanza en el perfil hasta el último pozo (No. 12); este comportamiento es contrario al de las concentraciones de As (Gráfico 57). Esto se puede justificar ya que al haber menos Fe en disolución puede indicar que hay menos Fe en la formación en forma de óxidos, evitando que el As sea adsorbido.

Por su lado, las concentraciones de Mn presentan una tendencia creciente que coincide con el As, esto se puede deber a que al haber Mn en disolución se puede deber a disolución de óxidos de Mn que liberan el As que tenían adsorbido aumentando la concentración de ambos iones en solución en el agua subterránea.



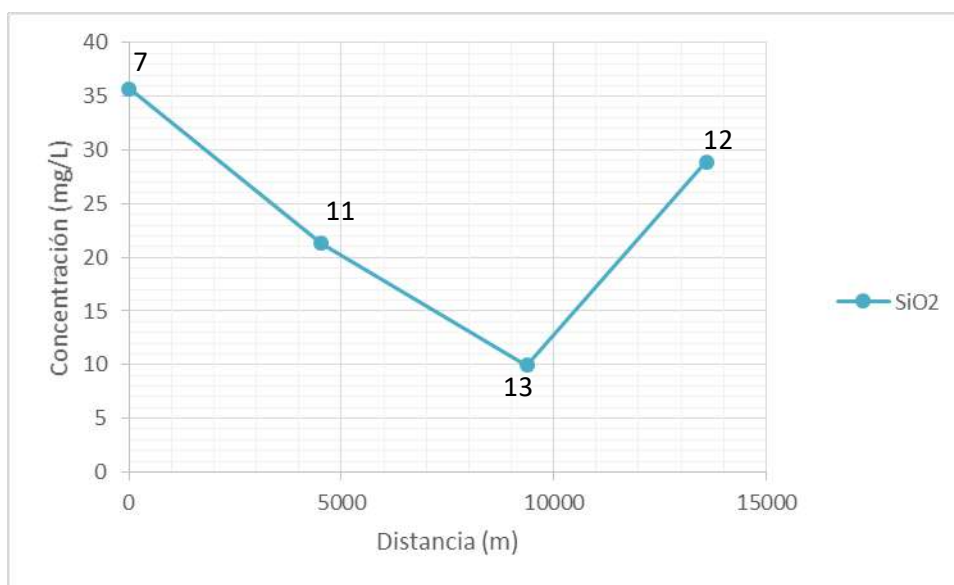
**Gráfico 58.** Perfil de las variaciones de hierro y manganeso a lo largo del flujo.

La relación del Al y As se muestra en el gráfico 59, la tendencia es inversa donde los puntos máximos de las concentraciones de As coinciden con puntos mínimos de las concentraciones de Al y viceversa. Esto podría indicar que cuando tenemos aluminio en disolución, el arsénico disminuye. Esto era esperado por el proceso de reemplazado que ocurre en los iones y que fue explicado anteriormente.



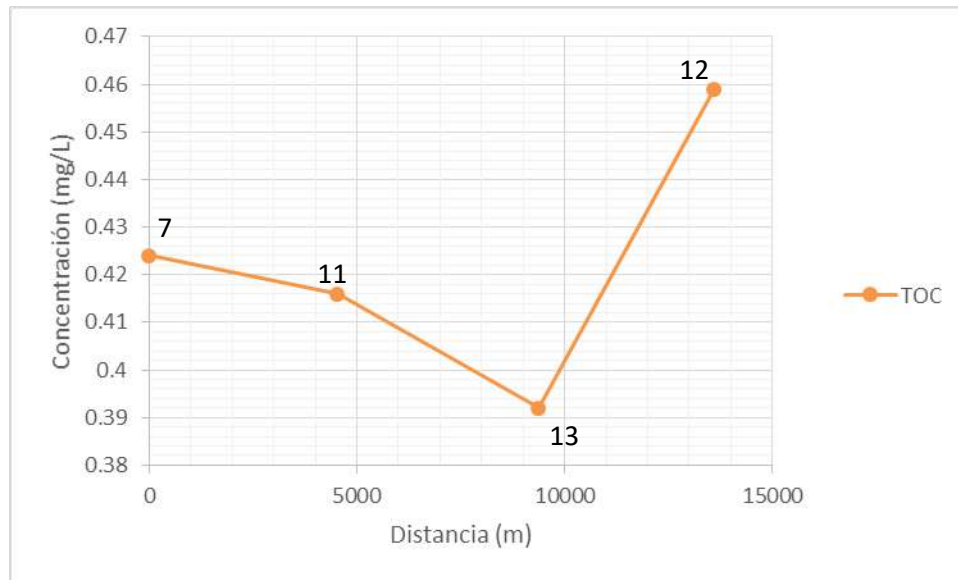
**Gráfico 59.** Perfil de las variaciones de arsénico y aluminio a lo largo del flujo.

El sílice presenta una tendencia decreciente hasta el pozo No. 13 y posteriormente una tendencia creciente (Gráfico 60).

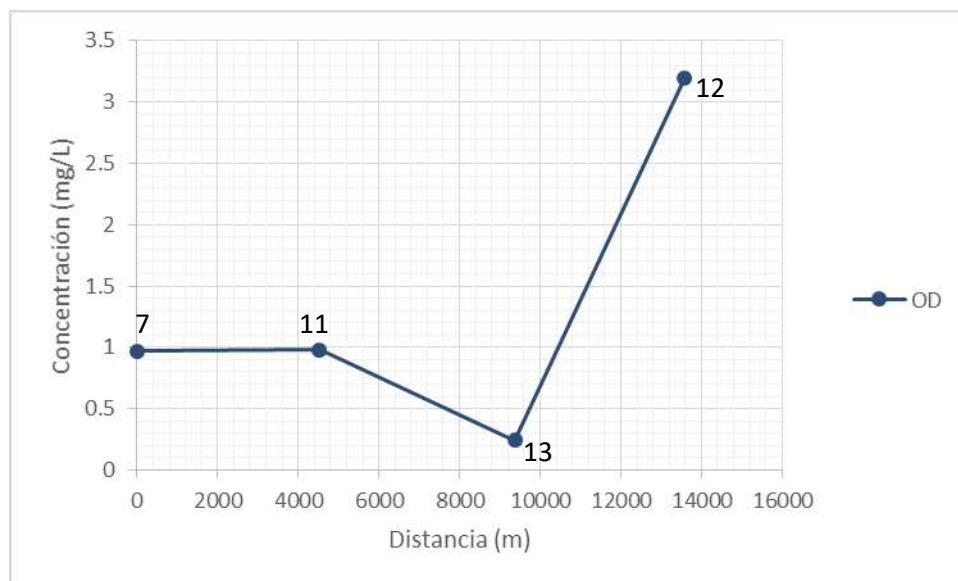


**Gráfico 60.** Perfil de las variaciones de sílice a lo largo del flujo.

La tendencia del T.O.C. y O.D. son similares, ambos son decrecientes al inicio el inicio de del perfil en los pozos No. 7, No. 11 y No. 13, donde en el pozo No. 13 se presentan las concentraciones más bajas, posteriormente las concentraciones aumentan. Esto indica que conforme aumenta el TOC aumenta el As (Gráfico 61), a la vez se correlaciona con un ambiente reductor. Sin embargo, el aumento de O.D. (Gráfico 62) indica que el ambiente oxidante e igual coincide con el aumento de As.



**Gráfico 61.** Perfil de las variaciones de carbono orgánico a lo largo del flujo.



**Gráfico 62.** Perfil de las variaciones de oxígeno disuelto a lo largo del flujo.

## **CAPITULO 5: Conclusiones y discusión**

1. En la zona de estudio se describe una secuencia litológica compuesta por tobas líticas, tobas cristalinas, tobas grises y verdes que se relacionan con la formación Venado. En el mapa geológico realizado para este estudio, se asocia esta formación al sector sur donde el relieve es más prominente en comparación con el resto del área analizada. Sobreyaciendo a esta unidad se encuentran lahares, que cubren el sector plano al norte del área de estudio, estos lahares están compuestos por arcillas arenosas de color rojizo con clastos de composición andesítica basáltica principalmente, asociados a la formación Buena Vista. La estratigrafía superficial de la zona en general se trata de rocas volcánicas del Mioceno al Plio-Pleistoceno.
2. Geomorfológicamente en la zona existe una unidad de llanura aluvial compuesta por terrazas fluviolacustres que a su vez forman parte del Graben de Nicaragua. En este estudio se determinaron estas terrazas asociadas a los depósitos arcillosos característicos de la llanura aluvial de la zona. Un aspecto importante en el área de estudio es la falla inferida que se determinó mediante lineamientos de ríos y expresiones geomorfológicas, además fue registrada en los perfiles geofísicos y el lineamiento es coincidente con las concentraciones anómalas en algunos elementos disueltos en el agua subterránea. Esta falla tiene una dirección este-oeste y según Denyer & Alvarado (2007) se trata de una falla inversa, sin embargo este dato sobre la falla no se pudo corroborar en el campo pero si es evidente una estructura que domina las expresiones geomorfológicas de la zona y la composición del agua subterránea.
3. Se analizaron muestras de roca y suelo en el área de estudio y se evidencia que todas las muestras contienen porcentajes variables de Mn, Fe y As, este último en forma de un mineral llamado Lindackerita que contiene dentro de su fórmula química cationes de As. Esto evidencia que la fuente de estos elementos en el agua subterránea se debe a la interacción entre el medio rocoso y el agua subterránea la cual circula de forma horizontal dentro del acuífero y vertical debido a infiltración de aguas meteóricas. Como se mencionó anteriormente la zona está

compuesta por rocas y sedimentos volcánicos ricos en vidrio volcánico y varios autores mencionados en este estudio atribuyen las concentraciones anómalas de estos elementos a la interacción del agua subterránea con estas litologías ricas en vidrio, como la formación Venado. Además en la zona hay vulcanismo activo y alteración hidrotermal que se evidencia en la textura tipo tigrillo que se menciona en el capítulo de geología.

4. Con la información de pozos de SENARA se realizan perfiles hidrogeológicos, de forma simplificada se determina que la unidad acuífera se encuentra alrededor de los 25 m de profundidad y está compuesta por tobas líticas y brechas. Sobreyaciendo esta unidad se encuentran las tobas y Lahares arcillosos poco permeables. Como se mencionó anteriormente fue en las tobas líticas y brechas donde se encontraron minerales con arsénico en los ensayos de difracción, por lo que esta litología se clasifica como la fuente del arsénico, y el contacto del agua subterránea con estas litologías genera reacciones químicas y disolución de minerales que promueven la movilidad del arsénico, manganeso y hierro; y las fracturas y alteración por el fallamiento local es un factor que promueve la liberación y movilidad de estos elementos hacia el agua subterránea. Por lo tanto se determina que las formaciones ricas en Mn y Fe con rastros de arsénico son las principales fuentes de estas concentraciones anómalas, específicamente la formación Buena Vista.
5. La movilización de estos elementos se atribuye a la alteración de las rocas volcánicas en la zona y al fallamiento que permiten alteración hidrotermal de las rocas y por lo tanto desintegración y liberación de especies iónicas. Este comportamiento se evidencia en los perfiles dibujados en los largo de la zona de estudio y en dirección del flujo de aguas subterráneas, donde alrededor de los 10 km en los alrededores de las localidades de Santa Cecilia y Cristo Rey se encuentran tendencias anómalas en la presencia de algunos iones en el agua donde algunas especies aumentan y otras disminuyen, esto se debe a que en este sitio se demarca la falla y producto de esta hay alteración hidrotermal de la roca y por lo tanto disolución de algunas especies y precipitación de otras. En este lineamiento se midieron concentraciones menores de As en la roca, mientras que el As disuelto en el agua es mayor. Además, el flujo de agua subterránea tiene

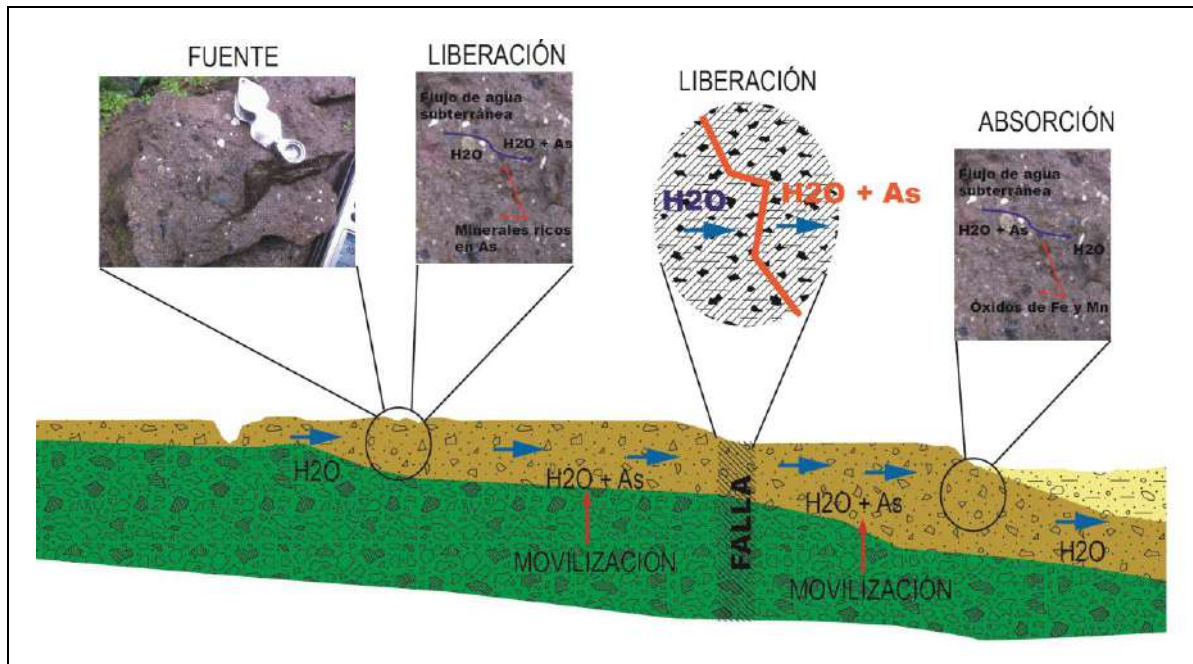
dirección norte por lo que se explica que después de los puntos de fallamiento las concentraciones aumentan en dicha dirección.

6. Es importante mencionar que los óxidos de hierro y manganeso se comportan como especies absorbentes de las especies de As y esto se evidencia en el estudio debido a que en los sitios donde las concentraciones de Mn y Fe son altas, estos elementos actúan como “filtros naturales” que atrapan al As, lo cual explica las bajas concentraciones de As en dichas zonas. Este fenómeno está controlado por el intercambio iónico y la adsorción-absorción, y estos a su vez ocurren en función del pH. En las muestras recolectadas se registraron pH neutros con tendencias ligeramente básicas, las condiciones neutras favorecen la absorción y el intercambio iónico, esto se ve reflejado en las concentraciones bajas de As debido a las concentraciones altas de Fe y Mn y los óxidos asociados a estas especies. Mientras que en los pozos donde el pH era ligeramente básico las concentraciones de As fueron mayores como en la localidad de Cristo Rey, Santa Cecilia, Las Nubes y La Virgen. También en el pozo No. 2 de Pavón, las concentraciones de As son menores y los pH registrados fueron ligeramente ácidos.
7. Otros parámetros que se midieron en las muestras fueron la C.E., O.D., Eh, pH, Fe y Mn los cuales presentan tendencias claras relacionadas con las concentraciones de As. Los sitios donde las concentraciones de As fueron mayores son: Tremedal 1, La Virgen, Santa Cecilia y Cristo Rey, todos estos sitios presentan altas conductividades eléctricas, pH ligeramente básicos, O.D. alto, Eh negativos y menores concentraciones de Fe. Según la teoría los valores de Eh negativos se correlacionan con valores altos de As, la C.E., está relacionada con los sólidos totales disueltos por lo tanto, para este estudio las altas C.E. se asocian a concentraciones altas de As, El pH neutro ligeramente básico permite que el As se encuentre en disolución debido a la oxidación y movilidad del mismo. De esta forma los resultados son consistentes con el marco teórico expuesto. Por lo contrario los sitios con concentraciones bajas de arsénico son: Vasconica, Cobano, Pavón y Tremedal 2. En estos sitios la C.E. es menor, el pH es neutro a ligeramente ácido, el O.D. es menor, el Eh es positivo y las concentraciones de Fe son mayores. Siguiendo estos criterios se realizaron gráficos para determinar coeficientes de relación para determinar estas condiciones que indican varios



autores en la teoría, y se afirma que las concentraciones de As son inversas a las concentraciones de Mn, Fe, O.D.; al contrario, las concentraciones son directamente proporcionales a la C.E. y al pH.

8. Se establece un modelo teórico de movilidad del arsénico, manganeso y hierro en las aguas subterráneas (Figura 30). Empezando por la fuente, se determina que la fuente es geogénica y se trata de la unidad de tobas líticas y brechas, la cual presenta alteración hidrotermal por el contexto magmático regional; esta unidad es la unidad acuífera de la zona la cual es captada por la mayoría de pozos. El agua subterránea de composición bicarbonatada cálcica se encuentra en contacto con la roca félsica de forma que hay disolución e interacciones iónicas entre el agua y el medio rocoso. El flujo subterráneo en dirección norte avanza, hasta llegar a la zona de la falla propuesta, donde hay fracturamiento intenso y alteración, esto permite que haya mayor infiltración de aguas superficiales y meteorización de las formaciones en el subsuelo. La formación presenta óxidos de hierro y manganeso en esta zona de falla debido a la alteración hidrotermal y a los cambios en las condiciones geoquímicas hacen que estas especies sean liberadas al agua subterránea. En este punto la desorción será un proceso primordial, donde se liberan las especies en cuestión, además puede haber intercambio catiónico. El flujo continúa hacia el norte enriquecido en arsénico, hierro y manganeso. Además en superficie se encuentra que los suelos están más enriquecidos en arsénico en las partes bajas del área de estudio, por lo que se debe incluir en el modelo, el proceso de meteorización en superficie que va alterando las formaciones ricas en minerales con arsénico y formando suelos residuales ricos en el elemento en las partes bajas, por lo que se podría esperar una recarga a los acuíferos con arsénico en estas zonas, e incluso fuentes superficiales como ríos y nacientes que al estar en contacto con estos suelos residuales podrían irse cargando en Mn, Fe y As; estos cuerpos de agua pueden aportar agua a los acuíferos y aumentar las concentraciones de dichas especies químicas.



**Figura 31** Modelo de liberación y movilidad del As.

## Capítulo 6: Recomendaciones

- 6.1 Diseño de redes de monitoreo para estudiar el flujo y el transporte que permitan recolectar muestras de agua puntuales, aguas arriba, aguas abajo, captando en forma aislada cada una de las unidades hidrogeológicas.
- 6.2 Se recomienda realizar un muestreo en el sitio con pozos de monitoreo, para poder tomar muestras puntuales. También realizar perforaciones exploratorias que ayuden a estudiar con detalle las litologías en la zona.
- 6.3 Se debe muestrear y realizar análisis de laboratorio detallados en la época lluviosa para determinar cambios estacionales y las variaciones que pueden generar cambios en el régimen climático.
- 6.4 Se recomienda hacer ensayos de tipo batch en las formaciones geológicas de la zona para determinar la movilidad desde la fase sólida a la fase líquida.

6.5 Realizar estudios similares en otras áreas del país en donde se puedan tener contextos geológicos semejantes a los encontrados en este estudio.

## Referencias Bibliográficas

- ALTAMIRANO, M. & BUNDSCHUH, J., 2009: Natural arsenic groundwater contamination of the sedimentary aquifers of southwestern Sébaco Valley, Nicaragua.-En: BUNDSCHUH, J., ARMIENTA, M., BIRKLE, P., BHATTACHARYA, P., MATSCHULLAT, J. & MUKHERJEE, A. (ed.): Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America (Vol. 1). - Taylor & Francis Group, London, 742: 109-122.
- APPELO, C., & POSTMAN, D., 2005: Geochemistry, groundwater and pollution.- 649 págs. Ed. A.A. Balkema Publishers. Great Britain.
- ASTORGA, Y; 2009: Situación del Recurso Hídrico. Decimocuarto informe.- Estado de la Nación. San José, Costa Rica.
- BABA, A. & SOZBILIR, H., 2012: Source of arsenic based on geological and hydrogeochemical properties of geothermal systems in western Turkey.- Chemical Geology, 334: 364-377.
- BALLESTERO, L., DOBRINESCU, M. & JAGER, G., 1995: An integrated geological and geophysical interpretation of the San Carlos Basin, Costa Rica.- Earth Sciences: 16:95-103.
- BERGOEING, J & PROTTI, R. 2006: Geomorfología Paleo-lacustre del sur del Lago de Nicaragua.- Instituto Panamericano de Geografía e Historia. Revista geográfica, 139.
- BOULDING, R. & GINN, J. 2004: Soil vadose zone and groundwater contamination, assessment, prevention and remediation.- 500 págs. Ed. CRC Press LLC, Florida.
- DENYER, P. & ALVARADO, G. 2007: Mapa geológico de Costa Rica.- Escala 1:400 000, Librería Francesa, San José.

- DELACRUZ, R., 1994: Reconocimiento de secciones estratigráficas, proyecto Crucitas.- Placer Dome, Costa Rica.
- CASTRO, M., 2006: Presencia de arsénico en el agua de bebida en América Latina y su efecto en la salud pública.- International Congress Mexico City.
- FRISCHBUTTER, A, 2002: Structure of the Managua graben, Nicaragua, from remote sensing images.- *Geofísica Internacional*, 41(2):87-102.
- FETTER, C.W; 2001: *Applied Hydrogeology*.-598 págs. Ed. Prentice Hall, New Jersey.
- FETTER, C.W; 1999: *Contaminant Hydrogeology*.- 500 págs. Ed. Prentice Hall, New Jersey.
- FLANAGAN, S., JOHNSTON, R. & ZHENG, Y., 2012: Arsenic in tube well water in Bangladesh: health and economic impacts and implication for arsenic mitigation.- *Bull World Health Organ*, 90:839-846.
- GARCÍA, M., MORENO, C., GALINDO, M., HIDALGO, M., FERNÁNDEZ, D. & SRACEK, O., 2009: Intermediate to high levels of arsenic and fluorite in deep geothermal aquifers from the northwestern Chaco-Pampean plain, Argentina.-En: BUNDSCHUH, J., ARMIENTA, M., BIRKLE, P., BHATTACHARYA, P., MATSCHULLAT, J. & MUKHERJEE, A. (ed.): *Natural Arsenic in Groundwaters of Latin America* (Vol. 1).- Taylor & Francis Group, London, 742: 69-79.
- HAMMARLUND, L. & PIÑONES, J., 2009: Arsenic in geothermal waters of Costa Rica.- 54 págs. Royal Institute of Technology, Stockholm [Tesis M.Sc.]
- HERNANDEZ, L., LAURITO, C., MARÍN, E. & ALVARADO, A., 2005: *Historia natural de Costa Rica*.- 105 págs. Instituto Nacional de Aprendizaje. San José.
- ILGEN, A., RYCHAGOV, S. & TRAINOR, T., 2011: Arsenic speciation and transport associated with the release of spent geothermal fluids in Mutnocsy field (Kamchatka, Russia).- *Chemical Geology*, 288: 115-132.

- KAO, Y., WANG, S., MAJI, S., LIU, C., WANG, P., CHANG, F. & LIAO, C., 2013: Hydrochemical, mineralization and isotopic investigation of arsenic distribution and mobilization in the Guandu wetland of Taiwan.- *Journal of Hydrology*, 498: 274-286.
- LA GACETA N°84, 2005: Decreto N° 32327-S.-16 págs. San José.
- LILLO, J., [s.f.]: Peligros geoquímicos, arsénico de origen natural en las aguas.- <https://www.ucm.es/data/>. [Consulta: 11 de setiembre del 2014].
- LITTER, M., ARMIENTA, M., & FARÍAS, S., 2009: Iberoarsen. Metodologías analíticas para la determinación y especiación de arsénico en aguas y suelos.- 242 págs. Ed. CYTED, Argentina.
- LITTER, M., & BUNDSCHUH, J., 2010: Iberoarsen. Situación del arsénico en la región Ibérica e Iberoamericana. Posibles acciones articuladas e integradas para el abatimiento el arsénico en zonas aisladas.- 56 págs. Ed. CYTED, Argentina.
- LÓPEZ, D., BUNDSCHUD, J., BIRKLE, P., ARMIENTA, M., CUMBAL, L., SRACEK, O., CORNEJO, L. & ORMACHEA, M., 2012: Arsenic in volcanic geothermal fluids of Latin America.- *Science of the total environment*, 429: 57-75.
- MATA, R. 1991: Los órdenes de suelos de Costa Rica.- Taller de erosión, UNA.
- MINAE, SENARA, AyA & UCR; 2014: Investigación geológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica sobre el origen del arsénico en la zona de Cañas-Bagaces y alrededores.- 298 págs. San José [Informe interno].
- MINAE, AyA, SENARA, ICE & BN, 2008: Plan de Abastecimiento de Agua y Gestión Integrada de las Aguas Residuales para Guanacaste.- 19 págs. San José [Informe interno].

- MOLLINEDO, N., 2014: Investigación Hidrogeológica para determinar el origen del arsénico en aguas para consumo humano en la región noroeste de Aguas Zarcas, San Carlos, Alajuela, Costa Rica.- 135 págs. Universidad de Costa Rica [Tesis M.Sc.]
- MORA, D., 2011: Acciones correctivas para disminuir las concentraciones de arsénico en el acueducto de la comunidad de Cañas.- 13 págs. ICAA, San José [Informe interno].
- MONTERO, V., QUESADA, J., LEDEZMA, A., & SANDOVAL, J., 2010: Determinación de arsénico en abastecimientos de agua para consumo humano en la provincia de Cartago.- *Acta Médica Costarricense*, 52: 96-101.
- MUKHERJEE, A., VERMA, S., GUPTA, S., HENKE, K. & BHATTACHARYA, P., 2013: Influence of tectonics, sedimentation and aqueous flow cycles on the origin of global groundwater arsenic: Paradigms from three continents.- *Journal of Hydrology*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.10.044>.
- OBANDO, L. 1986: Estratigrafía de la formación Venado y rocas sobreyacentes (Mioceno-Reciente), provincia de Alajuela, Costa Rica.-*Rev. Geól. Amer.Central*, 5:73-104.
- PIZARRO, D., 1993: Los pozos profundos perforados en Costa Rica, aspectos litológicos y bioestratigráficos.-*Rev. Geól. Amer. Central*, 15:81-85.
- QUESADA, R., 2007: Los bosques de Costa Rica.- 16 págs. IX Congreso Nacional de Ciencias, TEC, Cartago. 24 a 25 agosto 2007.
- ROJAS, N., ALFARO, M., SOLANO, J., ARAYA, C., VILLALOBOS, R. & SOLANO, P. 2011: Cuenca de Pocosol.- 19 págs. MINAE, IMN, PNUD, San José.
- TABELIN, C., IGARASHI, T. & RYOHEI, T., 2012: Mobilization and speciation of arsenic from hydrothermally altered rock in laboratory column experiments under ambient conditions.- *Applied Geochemistry*, 27: 326-342.

- THOMAS HE, Y., FITZMAURICE, A., BILGIN, A., CHOI, S., O'DAY, P., HORST, J., HARRINGTON, J., REISINGER, H., BURRIS, D. & HERING, J., 2010: Geochemical processes controlling arsenic mobility in groundwater: A case study of arsenic mobilization and natural attenuation.- *Applied geochemistry*, 25: 69-80.
- VINSON, D., MCINTOSH, J., DWYER, G., & VENGOSH, A., 2011: Arsenic and other oxyanions-forming trace elements in an alluvial basin aquifer: Evaluating source and mobilization by isotopic traces (Sr, B, S, O, H, Ra).- *Applied geochemistry*, 26: 1346-1376.



## ANEXOS

**ANEXO 1: Secciones petrográficas Los Chiles****Código SJ 4a 11/1/16****Procedencia: Distrito del Amparo, Los Chiles.***Descripción Macroscópica*

Roca toba de grano grueso de color negro.

Composición mineral de los fenocristales:, piroxenos xenomórficos con diámetros de 0,5 mm, opacos xenomórficos con tamaños de 0,5 mm y fragmentos líticos con diámetros de 2 mm.

Matriz de grano grueso (30%) de color negro.

Nombre: Toba clástica de grano gruesa.

*Descripción Microscópica*

Textura clástica con fenocristales de plagioclasa, augita, opacos y fragmentos líticos en una matriz hialina.

Composición mineral:

Fenocristales (70%)

Plagioclasa: cristales hipidiomórficos con tamaños máximos 2,0 x 2,0 mm y mínimos de 0.1 x 0,001 mm. Se presenta dentro de la roca con un porcentaje de 20%.

Augita: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 0,2 mm y mínimos de 0,01. Con un porcentaje de 5%.

Pirita: cristales hipidiomórficos con tamaños máximos de 0,3 x 0,3 mm y mínimos de 0,05 x 0,1 mm. El porcentaje en la roca es de 2%.

Magnetita: cristales xenomorficos con tamaños máximos de 0,3 mm y mínimos de 0,01 mm. El porcentaje en la roca es de 2%.

Clastos líticos: fragmentos xenomorficos con tamaños máximos de 2,0 mm y mínimos de 0,1 mm. El porcentaje en la roca es de 40%.

Minerales de alteración: óxidos de hierro y arcillas.

Minerales accesorios: olivino, zircón y apatito.

Matriz (30%)

Textura vitrofírica (Hialina), donde los fenocristales están rodeados por vidrio, compuesta por plagioclasas, augita y opacos.

*Nombre: Toba cristalina andesítica con cristales de plagioclasa, augita, magnetita y pirita en una matriz hialina.*

**Código SJ 4b 11/1/16**

**Procedencia: Distrito del Amparo, Los Chiles.**

*Descripción Macroscópica*

Roca toba de grano medio de color café.

Composición mineral de los fenocristales: magnetita xenomórfica con tamaños de 1 mm por 1 mm, arcillas como minerales de alteración.

Matriz de grano medio (50%) de color café.

Nombre: Toba de color café.

*Descripción Microscópica*

Textura clástica con cristales de plagioclasa, hornblenda basáltica y augita en una matriz hialina.

Composición mineral:

Fenocristales (54%)

Plagioclasa: cristales hipidiomórficos con tamaños máximos 0.64 x 0.24 mm y mínimos de 0.08 x 0.03 mm. Se presenta dentro de la roca con un porcentaje de 10%.

Hornblenda basáltica: cristales hipidiomórficos con tamaños máximos de 0,1 mm x 0,1 mm y mínimos de 0.05 x 0.03 mm. Con un porcentaje de 5%.

Cuarzo: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 0.2 mm y mínimos de 0,01 mm. Con un porcentaje de 4%.

Augita: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 1,0 mm y mínimos de 0,03 mm. Con un porcentaje de 10%.

Magnetita: cristales xenomórficos isótropos con tamaños máximos de 0,1 mm y mínimos de 0,01 mm. Con un porcentaje de 10%.

Minerales de alteración: Hematita.

Minerales accesorios: Olivino y biotita.

Matriz (46%)

Textura vitrofírica (Hialina) con fenocristales de plagioclasa, augita y opacos.

*Nombre: Toba cristalina basáltica con fenocristales de hornblenda basáltica, plagioclasa, augita y magnetita.*

**Código SJ 5a 12/1/16**

**Procedencia: Distrito del Amparo, Los Chiles.**

*Descripción Macroscópica*

Roca con textura afanítica porfirítica de color gris.

Composición mineral de los fenocristales: cristales de plagioclasa hipidiomórficos con tamaños de 1,0 mm por 0,5 mm, se presentan en un 16%, piroxenos hipidiomórficos con tamaños de 2,0 mm por 0,5 mm, se presentan en un 5%, anfíboles xenomórficos con tamaños de 2,0 mm por 1,0 mm, en un 3%. Vesículas de 3,0 mm de diámetro presentan en un 5%.

Matriz de grano fino (70%) de color gris.

Nombre: Andesita.

*Descripción Microscópica*

Textura hipocristalina porfirítica con fenocristales de plagioclasa, augita y opacos en una matriz hialopilitica.

Composición mineral:

Fenocristales (34%)

Plagioclasa: cristales hipidiomórficos a xenomórficos con tamaños máximos 1,0 mm y mínimos de 0,05 mm. Se presenta dentro de la roca con un porcentaje de 24%.

Augita: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 1,5 mm y mínimos de 0,05 mm. Con un porcentaje de 5%.

Pirita: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 0,3 mm y mínimos de 0,05 x 0,1 mm. El porcentaje en la roca es de 2%.

Olivino: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 0,1 mm y mínimos de 0,05 mm. El porcentaje en la roca es de 2%.

Magnetita: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 0,3 mm y mínimos de 0,01 mm. El porcentaje en la roca es de 3%.

Minerales de alteración: Calcita, sericita y arcillas.

Minerales accesorios: Zeolitas.

Matriz (66%)

Textura hialopilitica donde los fenocristales de plagioclasa, augita y opacos están rodeados por vidrio.

Nombre: Andesita basáltica porfirítica con alteración a carbonatos.

**Código SJ 5b 12/1/16**

**Procedencia: Distrito del Amparo, Los Chiles.**

*Descripción Macroscópica*

Roca con textura afanítica porfirítica de color gris.

Composición mineral de los fenocristales: cristales de plagioclasa hipidiomórficos con tamaños de 0,5 mm por 0,5 mm, se presentan en un 20%, piroxenos hipidiomórficos con tamaños de 3,0 mm por 1,5 mm, se presentan en un 10%.

Matriz de grano fino (70%) de color gris.

Nombre: Andesita.

*Descripción Microscópica*

Textura hipocristalina porfirítica con fenocristales de plagioclasa, augita y opacos en una matriz hialopilitica con microlitos de plagioclasa, augita, opacos y vidrio.

Composición mineral:

Fenocristales (48%)

Plagioclasa: cristales hipidiomórficos con tamaños máximos 1,3 mm por 1,0 mm y mínimos de 1,0 mm x 0,05 mm. Se presenta dentro de la roca con un porcentaje de 30%.

Augita: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 1,4 mm y mínimos de 0,05 mm. Con un porcentaje de 10%.

Pirita: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 0,5 mm y mínimos de 0,03 mm. El porcentaje en la roca es de 3%.



Ferromagnesianos: cristales xenomorficos con tamaños máximos de 0,2 mm y mínimos de 0,02 mm. El porcentaje en la roca es de 5%. Alterados a carbonatos.

Minerales de alteración: Epidota, calcita, arcillas, sericita.

Minerales accesorios: Apatito, Zircón, Cuarzo.

Matriz (52%)

Textura hialopilitica donde los fenocristales de plagioclasa, augita y opacos están rodeados por vidrio.

Nombre: Andesita basáltica porfirítica con augita y alteración a carbonatos.

**Código SJ 5c 12/1/16**

**Procedencia: Distrito del Amparo, Los Chiles.**

*Descripción Macroscópica*

Roca con textura afanítica porfírica de color gris.

Composición mineral de los fenocristales: cristales de plagioclasa hipidiomórficos con tamaños de 0,1 mm por 0,1 mm, se presentan en un 20%, piroxenos hipidiomórficos con tamaños de 3,0 mm por 2,0 mm, se presentan en un 10%. Vesículas con diámetros de 3 mm, presentes en un porcentaje de 5%.

Matriz de grano fino (65%) de color gris.

Nombre: Andesita.

*Descripción Microscópica*

Textura hipocristalina porfírica con fenocristales de plagioclasa, augita y opacos en una matriz hialopilitica con microlitos de plagioclasa, augita, opacos y vidrio.

Composición mineral:

Fenocristales (45%)

Plagioclasa: cristales hipidiomórficos con tamaños máximos 1,5 mm por 1,75 mm y mínimos de 0,1 mm x 0,1 mm. Se presenta dentro de la roca con un porcentaje de 26%.

Augita: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 2,5 mm y mínimos de 0,05 mm. Con un porcentaje de 11%.

Pirita: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 0,2 mm y mínimos de 0,02 mm. El porcentaje en la roca es de 2%.

Ferromagnesianos: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 0,9 mm y mínimos de 0,7 mm. El porcentaje en la roca es de 5%. Alterados a carbonatos.

Minerales de alteración: Clorita parda, clorita azul, carbonatos, óxidos de hierro.

Minerales accesorios: Apatito, olivino.

Matriz (55%)

Textura hialopilitica donde los fenocristales de plagioclasa, augita y opacos están rodeados por vidrio.

Nombre: Andesita basáltica porfirítica con augita y alteración a carbonatos y óxidos.

**Código SJ 6 12/1/16**

**Procedencia: Distrito del Amparo, Los Chiles.**

*Descripción Macroscópica*

Roca con textura afanítica porfirítica de color gris oscuro.

Composición mineral de los fenocristales: cristales de plagioclasa hipidiomórficos con tamaños de 1,5 mm por 1,0 mm, se presentan en un 20%. Piroxenos hipidiomórficos con tamaños de 2,0 mm por 1,0 mm, se presentan en un 1%. Cuarzo secundario xenomórfico con tamaños de 2,0 mm, y en un porcentaje de 5%. Olivino xenomórfico con tamaños de 1,0 mm, en un porcentaje de 2%. Vesículas con diámetros de 3 mm, presentes en un porcentaje de 10%.

Matriz de grano fino (62%) de color gris.

Nombre: Andesita basáltica.

*Descripción Microscópica*

Textura hipocristalina porfirítica con fenocristales de plagioclasa, augita, fantasmas de ferromagnesianos y opacos en una matriz hialopilitica con microlitos de plagioclasa, piroxenos, opacos y vidrio.

Composición mineral:

Fenocristales (44%)

Plagioclasa: cristales hipidiomórficos con tamaños máximos 2,5 mm x 1,0 mm y mínimos de 0,5 mm x 0,05 mm. Se presenta dentro de la roca con un porcentaje de 35%.

Augita titanífera: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 1,5 mm y mínimos de 0,05 mm. Con un porcentaje de 3%.

Pirita: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 0,2 mm y mínimos de 0,01 mm. El porcentaje en la roca es de 3%.

Fantasmas de olivino: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 0,4 mm y mínimos de 0,2 mm. El porcentaje en la roca es de 2%. Alterados a carbonatos.

Cuarzo: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 0,5 mm y mínimo de 0,03 mm. Se presenta dentro de la roca en un porcentaje de 1%.

Minerales de alteración: Carbonatos, epidota y clorita azul.

Minerales accesorios: Clorita, calcita, epidota y zircón.

Matriz (56%)

Textura hialopilitica donde los fenocristales de plagioclasa, augita, olivino y opacos están rodeados por vidrio.

Nombre: Andesita basáltica porfirítica con augita y olivino con alteración a carbonatos.

**Código SJ 8 12/1/16**

**Procedencia: Distrito del Amparo, Los Chiles.**

*Descripción Macroscópica*

Roca con textura afanítica porfirítica de color gris.

Composición mineral de los fenocristales: cristales de plagioclasa hipidiomórficos con tamaños de 1,5 mm por 1,0 mm, se presentan en un 25%. Piroxenos hipidiomórficos con tamaños de 2,0 mm por 1,0 mm, se presentan en un 5%.

Matriz de grano fino (70%) de color gris.

Nombre: Andesita basáltica.

*Descripción Microscópica*

Textura hipocristalina porfirítica con fenocristales de plagioclasa, augita, olivino y opacos en una matriz hialopilitica.

Composición mineral:

Fenocristales (45%)

Plagioclasa: cristales hipidiomórficos con tamaños máximos 1,4 mm x 1,0 mm y mínimos de 0,1 mm x 0,05 mm. Se presenta dentro de la roca con un porcentaje de 26%.

Augita: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 2,0 mm y mínimos de 0,05 mm. Con un porcentaje de 8%.

Opacos: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 0,9 mm y mínimos de 0,02 mm. El porcentaje en la roca es de 3%.

Olivino: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 0,3 mm y mínimos de 0,1 mm. El porcentaje en la roca es de 5%. Alterados a carbonatos.

Calcita: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 0,1 mm y mínimo de 0,01 mm. Se presenta dentro de la roca en un porcentaje de 4%.

Minerales de alteración: Sericita, epidota y calcita.

Minerales accesorios: Hipersteno.

Matriz (55%)

Textura Intergranular con fenocristales de plagioclasa y opacos principalmente, con olivino.

Nombre: Basalto porfírico con augita y olivino con alteración a carbonatos y epidota.

**Código SJ 10a 13/1/16**

**Procedencia: Distrito del Amparo, Los Chiles.**

*Descripción Macroscópica*

Roca toba lítica con pómez.

Composición mineral de los fenocristales: cristales de plagioclasa hipidiomórficos con tamaños de 1,5 mm por 1,0 mm, se presentan en un 10%. Fragmentos líticos xenomórficos con diámetros máximos de 3 cm y mínimos de 0,2 cm. Pómez xenomórfica con diámetros máximos de 1 cm.

Matriz de grano fino (60%) de color café.

Nombre: Toba lítica con pómez.

*Descripción Microscópica*

Textura hipocristalina porfirítica con fenocristales de plagioclasa, augita, olivino y opacos en una matriz hialopilitica.

Composición mineral:

Fenocristales (60%)

Plagioclasa: cristales hipidiomórficos con tamaños máximos 0,7 mm x 0,5 mm y mínimos de 0,1 mm x 0,01 mm. Se presenta dentro de la roca con un porcentaje de 5%.

Augita: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 2,0 mm y mínimos de 0,05 mm. Con un porcentaje de 2%.

Opacos: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 0,9 mm y mínimos de 0,02 mm. El porcentaje en la roca es de 2%.



Hornblenda basáltica: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 0,3 mm y mínimos de 0,1 mm. El porcentaje en la roca es de 1%..

Pómez: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 0,1 mm y mínimo de 0,01 mm. Se presenta dentro de la roca en un porcentaje de 20%.

Líticos: fragmentos xenomórficos con tamaños máximos de 10 mm y mínimo de 1,0 mm. Se presenta dentro de la roca en un porcentaje de 30%.

Minerales de alteración: Pirita, magnetita, arcillas.

Minerales accesorios: Pirita.

Matriz (40%)

Textura clástica con líticos, y fenocristales de plagioclasa y opacos.

Nombre: Toba lítica andesítica con pómez, en una matriz hialino cristalina con fenocristales de plagioclasa, augita y hornblenda basáltica.

**Código SJ 10b 13/1/16**

**Procedencia: Distrito del Amparo, Los Chiles.**

*Descripción Macroscópica*

Roca con textura afanítica porfírica de color gris.

Composición mineral de los fenocristales: cristales de plagioclasa hipidiomórficos con tamaños de 1,0 mm por 1,0 mm, se presentan en un 20%. Piroxenos hipidiomórficos con tamaños de 3,0 mm por 1,0 mm, se presentan en un 10%. Vesículas con diámetro de 3,0 mm presentes en un porcentaje de 10%.

Matriz de grano fino (60%) de color gris.

Nombre: Andesita.

*Descripción Microscópica*

Textura afanítica porfírica con fenocristales de plagioclasa, piroxenos, opacos y vesículas en una matriz hialopilitica.

Composición mineral:

Fenocristales (48%)

Plagioclasa: cristales hipidiomórficos con tamaños máximos 0,07 mm x 0,05 mm y mínimos de 0,05 mm x 0,01 mm. Se presenta dentro de la roca con un porcentaje de 30%.

Augita: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 0,4 mm y mínimos de 0,02 mm. Con un porcentaje de 12%.

Opacos: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 0,1 mm y mínimos de 0,01 mm. El porcentaje en la roca es de 4%.

Ferromagnesianos: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 0,3 mm y mínimos de 0,1 mm. El porcentaje en la roca es de 1%. Alterados a óxidos.

Calcita: cristales xenomórficos con tamaños máximos de 0,1 mm y mínimo de 0,01 mm. Se presenta dentro de la roca en un porcentaje de 4%.

Minerales de alteración: Carbonatos y arcillas.

Minerales accesorios: Hipersteno, zircón, cuarzo.

Matriz (52%)

Textura hialopilitica con fenocristales de plagioclasa, augita y opacos.

Nombre: Andesita porfírica con augita y alteración a óxidos de hierro.

**ANEXO 2: Datos de época seca**

Pozo	No.	Fecha	Localidad	Geología	X	Y	prof. (m)	pH	Temp. (°C)	O.D (mg/l)	C.O.T (mg/l)	C.E (uS/cm)	Eh (V)	Alcalinidad (mg/l)	T.D.S (mg/l)
<b>MQ-1</b>	1	01/25/2016	San José	Toba	427140	1200096	34	6.50	27.1	1.39	0.325	166	652.6	76	58
	2	01/25/2016	Pavón1 (Pozo2)	Toba	431506	1198082	76	4.70	26.8	1.9	0.279	30	330.5	76	58
<b>MQ-37</b>	3	01/25/2016	Pavon2 (pozo3)	Toba	432968	1197181	75	6.50	26.6	0.8	0.225	172.6	252.8	4	6
<b>MQ-25</b>	4	01/26/2016	Tremedal1	Toba	429589	1204810	56	6.91	26.9	0.25	0.425	215	174	98	66
<b>INV-216</b>	5	01/26/2016	Tremedal2	Toba	430020	1200901	50	5.93	27.0	0.4	0.278	92.8	126.1	35	30
<b>MQ-11</b>	6	01/26/2016	La Virgen	Arena	433218	1203355	30	7.60	26.8	0.21	0.504	228	-13.3	103	50
<b>SJ-8</b>	7	01/27/2016	San Antonio	Toba	434808	1193802	120	6.97	26.6	0.97	0.424	216	273.8	92.0	85.0
<b>MQ-22</b>	8	01/27/2016	Gallito	Arena	428390	1198281	46	6.27	27.3	0.37	0.380	139.2	59.00	59.00	54.00
	10	01/27/2016	Vasconia	Toba	429525	1197250	40	6.01	26.5	2.03	0.301	105.8	220.2	45	46
<b>SJ-9</b>	11	01/27/2016	Cobano	Arena	437136	1197665	30	6.01	26.4	0.98	0.416	112.4	51.4	43	42
<b>MQ-15</b>	12	01/28/2016	Las Nubes	Arena	441776	1205415	45	7.77	27.35	3.2	0.459	219	0	111	83
<b>MQ-19</b>	13	01/28/2016	Cristo Rey	Arena	439572	1201818	63	7.86	28.4	0.24	0.392	169	0	84	28
<b>MQ-25</b>	14	01/28/2016	Santa Cecilia	Toba	431972	1201827	20	7.81	27.35	0.32	0.422	211	0	105	83

**ANEXO 2: Datos de época seca (Continuación)**

Pozo	No.	Fecha	Localidad	Geología	X	Y	prof. (m)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	Mn (mg/l)	Fe (mg/l)	As (mg/l)
MQ-1	1	01/25/2016	San José	Toba	427140	1200096	34	10	3.60	4.4	16.1	0.00764	0.0066	0.004430
	2	01/25/2016	Pavón1 (Pozo2)	Toba	431506	1198082	76	11	3.20	3.4	17.7	0.04560	0.0201	0.000166
MQ-37	3	01/25/2016	Pavon2 (pozo3)	Toba	432968	1197181	75	0	0.00	1.0	1.0	0.04120	0.0040	0.001970
MQ-25	4	01/26/2016	Tremedal1	Toba	429589	1204810	56	15	3.70	4.9	18.5	0.00188	0.0036	0.009650
INV-216	5	01/26/2016	Tremedal2	Toba	430020	1200901	50	5.9	2.00	2.4	8.1	0.00195	1.939	0.001850
MQ-11	6	01/26/2016	La Virgen	Arena	433218	1203355	30	26	4.50	3.9	13.7	0.05700	0.00551	0.009420
SJ-8	7	01/27/2016	San Antonio	Toba	434808	1193802	120	11	3.90	7.8	21	0.00909	0.00437	0.004800
MQ-22	8	01/27/2016	Gallito	Arena	428390	1198281	46	10	3.50	5.4	12.9	0.11440	0.0993	0.004380
	10	01/27/2016	Vasconia	Toba	429525	1197250	40	6.4	3.10	6.4	8.1	0.00212	0.0087	0.001259
SJ-9	11	01/27/2016	Cobano	Arena	437136	1197665	30	7.4	2.30	4.4	9.7	0.08090	1.094	0.000796
MQ-15	12	01/28/2016	Las Nubes	Arena	441776	1205415	45	23	4.40	8.8	18.5	0.45200	0.0325	0.015730
MQ-19	13	01/28/2016	Cristo Rey	Arena	439572	1201818	63	35	3.20	2	8.1	0.03100	0.0472	0.009880
MQ-25	14	01/28/2016	Santa Cecilia	Toba	431972	1201827	20	17	4.60	5.4	24.2	0.47000	0.0530	0.004620

**ANEXO 2: Datos de época lluviosa**

Pozo	No.	Fecha	Localidad	Geología	X	Y	prof. (m)	pH	Temp. (°C)	O.D (mg/l)	C.E (uS/cm)	Eh (V)	Alcalinidad (mg/l)	T.D.S (mg/l)
<b>MQ-1</b>	1	01/25/2016	San José	Toba	427140	1200096	34	7.16	27.3	0.15	163	-538.5	87	60
	2	01/25/2016	Pavón1 (Pozo2)	Toba	431506	1198082	76	6.99	26.7	0.89	162.2	331.2	89	60
<b>MQ-37</b>	3	01/25/2016	Pavon2 (pozo3)	Toba	432968	1197181	75	5.59	26.9	0.34	29.9	394.2	4	20
<b>MQ-25</b>	4	01/26/2016	Tremedal1	Toba	429589	1204810	56	6.33	27.3	2.66	56.5	-229.5	19	16
<b>INV-216</b>	5	01/26/2016	Tremedal2	Toba	430020	1200901	50	6.66	27.7	2	82.8	17	35	30
<b>MQ-11</b>	6	01/26/2016	La Virgen	Arena	433218	1203355	30	8.58	26.8	2.26	215.9	256.5	103	50
<b>SJ-8</b>	7	01/27/2016	San Antonio	Toba	434808	1193802	120	7.66	26.8	1.71	204	216.4	115	89
<b>MQ-22</b>	8	01/27/2016	Gallito	Arena	428390	1198281	46	6.7	27.3	1.73	137.8	101.7	77	52
	10	01/27/2016	Vasconia	Toba	429525	1197250	40	6.33	26.6	1.94	98.8	234.3	28	22
<b>SJ-9</b>	11	01/27/2016	Cobano	Arena	437136	1197665	30		26		--	--	--	--
<b>MQ-15</b>	12	01/28/2016	Las Nubes	Arena	441776	1205415	45	7.89	27.2	0.18	216	-47.9	129	77
<b>MQ-19</b>	13	01/28/2016	Cristo Rey	Arena	439572	1201818	63	7.46	28	0.6	161.8	-84.3	73	22
<b>MQ-25</b>	14	01/28/2016	Santa Cecilia	Toba	431972	1201827	20	8.28	27.6	4.46	218.9	87.9	124	81

**ANEXO 2: Datos de época lluviosa (Continuación)**

Pozo	No.	Fecha	Localidad	Geología	X	Y	prof. (m)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Mg (mg/l)	Ca (mg/l)	Mn (mg/l)	Fe (mg/l)	As (mg/l)
MQ-1	1	01/25/2016	San José	Toba	427140	1200096	34	12	4	4.9	16.1	0.000071	0	0.002
	2	01/25/2016	Pavón1 (Pozo2)	Toba	431506	1198082	76	11	3	4.9	16.1	0	0	0
MQ-37	3	01/25/2016	Pavon2 (pozo3)	Toba	432968	1197181	75	0	0	1	6.4	0.000444	0.000283	0
MQ-25	4	01/26/2016	Tremedal1	Toba	429589	1204810	56	5.8	0	1	4.8	0	0	0
INV-216	5	01/26/2016	Tremedal2	Toba	430020	1200901	50	6.5	2	3.4	6.4	0.000137	0.003127	0
MQ-11	6	01/26/2016	La Virgen	Arena	433218	1203355	30	25	5.5	4.4	12.9	0.000433	0	0.068
SJ-8	7	01/27/2016	San Antonio	Toba	434808	1193802	120	11	4.4	8.3	21.8	0	0	0.024
MQ-22	8	01/27/2016	Gallito	Arena	428390	1198281	46	9.6	3.1	4.9	12.9	0.000849	0.0993	0.021
	10	01/27/2016	Vasconia	Toba	429525	1197250	40	6.9	3.2	1.5	6.4	0	0	0
SJ-9	11	01/27/2016	Cobano	Arena	437136	1197665	30	--	--	--	--	--	--	--
MQ-15	12	01/28/2016	Las Nubes	Arena	441776	1205415	45	20	7.8	7.8	17.7	0.000309	0.000218	0.025
MQ-19	13	01/28/2016	Cristo Rey	Arena	439572	1201818	63	21	2.3	1	7.3	0.000178	0.00411	0.084
MQ-25	14	01/28/2016	Santa Cecilia	Toba	431972	1201827	20	14	4.4	5.4	23.4	0.004362	0.003986	0.1677

**ANEXO 3: Datos geofísico**





**Estudio hidrogeológico para disponibilidad hídrica en la región Los Chiles, Alajuela.**  
**Contratación: 2016CDS-00042-PRI.**



**R – 042 – 2016**

**Setiembre, 2016**

**LOS CHILES - COSTA RICA**

23 de setiembre del 2016

MSc. Viviana Ramos Sánchez.  
Directora Área Funcional Hidrogeología – UEN Gestión Ambiental.  
Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados.

Estimada Geóloga.

Me complace hacer entrega del estudio hidrogeológico para disponibilidad hídrica en la región Los Chiles, Alajuela.

El presente informe incluye:

- Datos de resistividad eléctrica tomados bajo norma ASTM-D 6431-99 (2010).
- Curvas de resistividad de cada sondeo.
- Modelo geológico interpretado en perfiles electos
- Integración de reporte geológico de pozos realizados por SENARA y otras fuentes

Doy fe que los datos y resultados aquí aportados han sido tomados con un alto grado de control de calidad, acorde a la fase de desarrollo de este proyecto.

Atentamente

Carlos Leandro Montoya  
Geólogo – Geofísico  
CG # - 134  
**Gerente Ingeofica Dos Mil S.A.**

*Estudio hidrogeológico para disponibilidad hídrica en la región Los Chiles, Alajuela.*  
R – 042 – 2016.



## TABLA DE CONTENIDOS

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>5</b>
1.1 SITUACIÓN GEOGRÁFICA Y OBJETIVO.....	6
1.2 METODOLOGÍA DE PROSPECCIÓN ELÉCTRICA .....	7
1.3 PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN. ....	12
<b>2. RESULTADOS OBTENIDOS POR SONDEO Y MODELO DE PERFILES GEOELÉCTRICOS .....</b>	<b>13</b>
2.1 INTRODUCCIÓN .....	14
2.2 RESULTADOS DEL PERFIL P-1 (SEV 1 Y 2) .....	16
2.2.1 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL SONDEO SEV 1. ....	17
2.2.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL SONDEO SEV 2. ....	18
2.3 RESULTADOS DEL PERFIL P-2 (SEV 8, 9 10, 3, 4, 5, 6, 7).....	20
2.3.1 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL SONDEO SEV 8. ....	21
2.3.2 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL SONDEO SEV 9. ....	22
2.3.3 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL SONDEO SEV 10. ....	23
2.3.4 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL SONDEO SEV 3. ....	24
2.3.5 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL SONDEO SEV 4. ....	25
2.3.6 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL SONDEO SEV 5. ....	26
2.3.7 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL SONDEO SEV 6. ....	27
2.3.8 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL SONDEO SEV 7. ....	28
<b>3. CONCLUSIONES.....</b>	<b>30</b>
<b>4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>31</b>
<b>ANEXO 1: LAMINAS .....</b>	<b>32</b>
<b>Fotografías.</b>	
Foto 1. Vista del sondeo SEV 10. ....	1
Foto 2. Labor de campo en el SEV 3. ....	5
Foto 3. Camino de acceso al sondeo 7. ....	13
Foto 4. Sitio del sondeo eléctrico. ....	17
Foto 5. Tendido de cable en la elaboración del sondeo. ....	18
Foto 6. Prospección del sondeo eléctrico. ....	21
Foto 7. Sitio del sondeo eléctrico. ....	22
Foto 8. Labor de prospección en el sitio SEV 10. ....	23
Foto 9. Vista general del sitio prospectado. ....	24
Foto 10. Labor de prospección. ....	25
Foto 11. Labor de prospección. ....	26
Foto 12. Vista general del sitio prospectado. ....	27
Foto 13. Vista del sitio del sondeo. ....	28

## Figuras.

Figura 1. Ubicación regional de la zona de estudio y ambos perfiles. ....	6
Figura 2. Posición de los sondeos eléctricos para la zona de estudio. ....	9
Figura 3. Esquema básico del sondeo eléctrico vertical con arreglo tipo Schlumberger. ....	10
Figura 4. Características del equipo de resistividad Tigre, de la casa Allied Associates. ....	11
Figura 5. Curva de resistividad SEV 1, P-1. ....	17
Figura 6. Curva de resistividad SEV 2, P-1. ....	18
Figura 7. Resultados obtenidos en el perfil geoelectrico P-1. ....	19
Figura 8. Curva de resistividad SEV 8, P-2. ....	21
Figura 9. Curva de resistividad SEV 9, P-2. ....	22
Figura 10. Curva de resistividad SEV 10, P-2. ....	23
Figura 11. Curva de resistividad SEV 3, P-2. ....	24
Figura 12. Curva de resistividad SEV 4, P-2. ....	25
Figura 13. Curva de resistividad. SEV 5, P-2. ....	26
Figura 14. Curva de resistividad. SEV 6, P-2. ....	27
Figura 15. Curva de resistividad SEV 7, P-2. ....	28
Figura 16. Resultados obtenidos en el perfil geoelectrico P-2. ....	29

## Cuadros.

Cuadro 1. Ubicación geográfica de los sondeos eléctricos verticales y su respectivo perfil. ....	7
Cuadro 2. Ubicación general, longitud y sondeos de cada perfil. ....	8
Cuadro 3. Correlación geológica y simbología general del perfil P-1 y el perfil P-2. ....	15
Cuadro 4. Datos generales. ....	17
Cuadro 5. Datos de campo y filtrado del SEV 1, P-1. ....	17
Cuadro 6. Modelo numérico del SEV 1, P-1. ....	17
Cuadro 7. Datos generales. ....	18
Cuadro 8. Datos de campo y filtrado del SEV 2, P-1. ....	18
Cuadro 9. Modelo numérico del SEV 2, P-1. ....	18
Cuadro 10. Datos generales. ....	21
Cuadro 11. Datos de campo y filtrado del SEV 8, P-2. ....	21
Cuadro 12. Modelo numérico del SEV 8, P-2. ....	21
Cuadro 13. Datos generales. ....	22
Cuadro 14. Datos de campo y filtrado del SEV 9, P-2. ....	22
Cuadro 15. Modelo numérico del SEV 9, P-2. ....	22
Cuadro 16. Datos generales. ....	23
Cuadro 17. Datos de campo y filtrado del SEV 10, P-2. ....	23
Cuadro 18. Modelo numérico del SEV 10, P-2. ....	23
Cuadro 19. Datos generales. ....	24
Cuadro 20. Datos de campo y filtrado del SEV 3, P-2. ....	24
Cuadro 21. Modelo numérico del SEV 3, P-2. ....	24
Cuadro 22. Datos generales. ....	25
Cuadro 23. Datos de campo y filtrado del SEV 4, P-2. ....	25
Cuadro 24. Modelo numérico del SEV 4, P-2. ....	25
Cuadro 25. Datos generales. ....	26
Cuadro 26. Datos de campo y filtrado del SEV 5, P-2. ....	26
Cuadro 27. Modelo numérico del SEV 5, P-2. ....	26
Cuadro 28. Datos generales. ....	27
Cuadro 29. Datos de campo y filtrado del SEV 6, P-2. ....	27
Cuadro 30. Modelo numérico del SEV 6, P-2. ....	27
Cuadro 31. Datos generales. ....	28
Cuadro 32. Datos de campo y filtrado del SEV 7, P-2. ....	28
Cuadro 33. Modelo numérico del SEV 7, P-2. ....	28



## 1. INTRODUCCIÓN



Foto 2. Labor de campo en el SEV 3.

## 1.1 Situación Geográfica y Objetivo.

El área estudiada se ubica en la provincia 2º Alajuela, cantón 14º Los Chiles y al distrito 1º Homónimo. La figura 1 muestra mediante un recuadro amarillo la ubicación general de la zona prospectada y con señaladores la ubicación de cada perfil. (Tomado de Google Earth, 2016).



**Figura 1. Ubicación regional de la zona de estudio y ambos perfiles.**

El presente estudio tiene por objetivo hacer una correlación de las capas que identifica el método eléctrico, con la estratigrafía local obtenida de la literatura disponible.

## 1.2 Metodología de Prospección Eléctrica

El método empleado fue el sondeo eléctrico vertical (SEV) usando el arreglo electródico tipo Schlumberger, con el que se realizaron 10 SEV dispuestos en el campo como lo ilustra el siguiente cuadro 1 y las figuras 1 y 2 con la numeración asignada por el personal de Acueductos y Alcantarillados.

**Cuadro 1. Ubicación geográfica de los sondeos eléctricos verticales y su respectivo perfil.**

Sondeo eléctrico vertical	Perfil	Coordenadas Lambert Norte
SEV 1	P-1	317780,415 / 467327,902
SEV 2	P-1	317747,819 / 469969,304
SEV 3	P-2	315653,665 / 475971,634
SEV 4	P-2	313194,308 / 475971,634
SEV 5	P-2	312493,424 / 473758,178
SEV 6	P-1, P-2	317687,554 / 477003,568
SEV 7	P-2	318317,526 / 474078,919
SEV 8	P-2	308347,612 / 471989,847
SEV 9	P-2	310225,972 / 473851,376
SEV 10	P-2	311008,216 / 474673,422

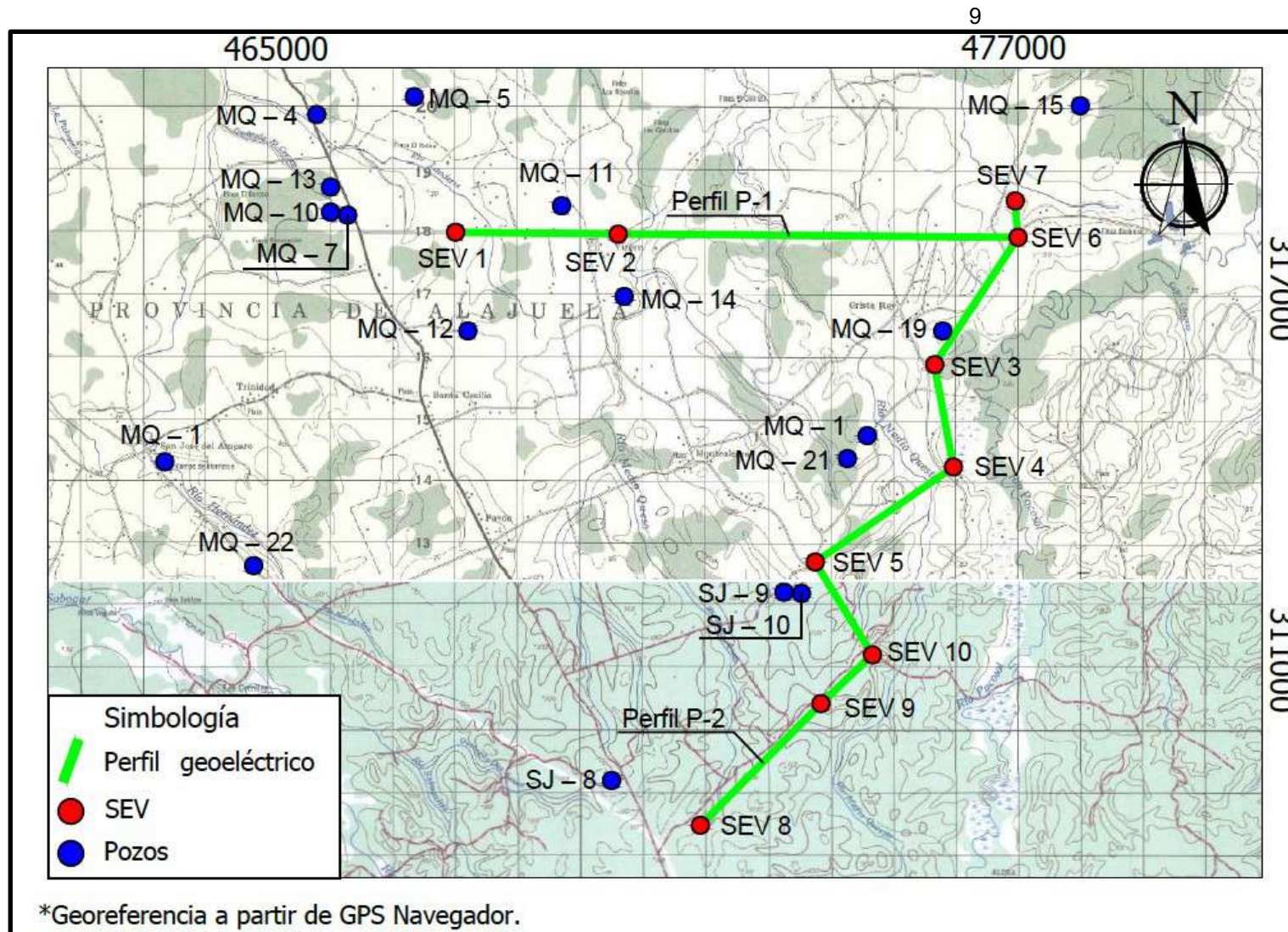
Para efecto de unir la información de todos los sondeos en un contexto o modelo geológico, se eligieron 2 perfiles preferenciales tomando el pseudo alineamiento de los sondeos para así trazar los perfiles indicados en la siguiente cuadro 2.

**Cuadro 2. Ubicación general, longitud y sondeos de cada perfil.**

<b>Perfil</b>	<b>SEV</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Sector</b>
<b>P1</b>	1, 2, 6	2640	Los Chiles
<b>P2</b>	8, 9, 10, 3, 4, 5, 6, 7	12900	Los Chiles

La siguiente figura 2, señala el trazo de cada uno de los perfiles.

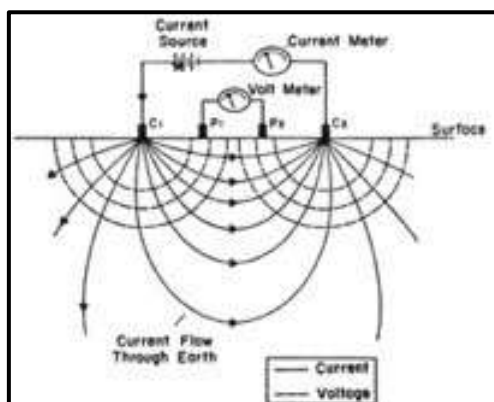




**Figura 2. Posición de los sondeos eléctricos para la zona de estudio.**

El método empleado (acorde a la norma ASTM D6431-99 (2010)), corresponde se realizó con un arreglo cuadripolar tipo **Schlumberger**, en el cual se usan 4 electrodos colineales en superficie; los dos exteriores, conectados en serie a una batería o fuente de poder son los electrodos de corriente, en tanto que los interiores se denominan de potencial.

Las resistividades apuentes tomadas en el campo tienen un filtro inicial para eliminar “picos” los cuales son mostradas como resistividades calculadas en los cuadros de datos. Es importante aclarar que los valores de las resistividades asociadas a cada capa, son obtenidos en la corrida del modelo y pueden reflejar valores muy diferentes a los obtenidos en las aparentes tomados en el campo.



**Figura 3. Esquema básico del sondeo eléctrico vertical con arreglo tipo Schlumberger.**

Para la interpretación de los datos, se usa el programa RESIXP y tanto los datos como las curvas de resistividad se adjunta en cada ficha técnica.

El equipo usado es un resistivímetro marca Tigre de la Compañía inglesa Allied Associates. La figura 4, muestra algunas de las características de la unidad.



**Figura 4. Características del equipo de resistividad Tigre, de la casa Allied Associates.**

El error estimado puede tener 2 fuentes de origen. La primera se da, durante la toma de datos de campo, en la posible deflexión o desplazamiento al momento de colocar los electrodos por temas topográficos o de comodidad al medir extensos AB/2 cuyas trayectorias salvan propiedades privadas o estructuras antropogénicas. El segundo error se da cuando se plantea el modelo a ser invertido por los procesos del cálculo de capas resistivas y profundidades diversas. Varios modelos que se construyen pueden generar una misma curva de campo, de ahí la importancia de tener guías estratigráficas o cierto conocimiento de la geología del entorno para tratar de evocar un modelo más ajustado a la realidad geológica.

En general se estima que con la sumatoria de estas fuentes de error, el valor de éste puede ser de hasta un 15 - 20 % en profundidad.

Otro tipo de error por ajuste entre la curva de resistividad aparente y la curva que genera el modelo propuesto, siempre se mantuvo bajo el 5% de error.

### **1.3 Profundidad de penetración.**

La profundidad de penetración de un sondeo en realidad no puede ser a ciencia cierta predicha o establecida porque va a depender básicamente del contraste de impedancia eléctrica de los materiales tanto como de la resistividad aparente de cada una de las capas ( Del valle, 1990) ( Dobrit y Sarit, 1988).

Otros autores y nuestra experiencia personal se considera que en términos generales, la profundidad de penetración a investigar se estima entre 1/4 a 1/3 del AB total, en este caso con un AB= 350 m, se espera una profundidad de penetración de hasta 200 metros, aunque pueden haber casos en que se alcancen grandes profundidades por la eficiencia y precisión del equipo y fuente. Otros factores como la saturación del suelo y la impedancia de los mismos cables conductores son parte de este análisis. En toda salida de cualquier software que se use para modelar un sondeo, se acredita a la última capa, una profundidad infinita, en el presente caso, se usa un valor de profundidad prudente entre los 150 a 200 metros.



## 2. RESULTADOS OBTENIDOS POR SONDEO Y MODELO DE PERFILES GEOELÉCTRICOS

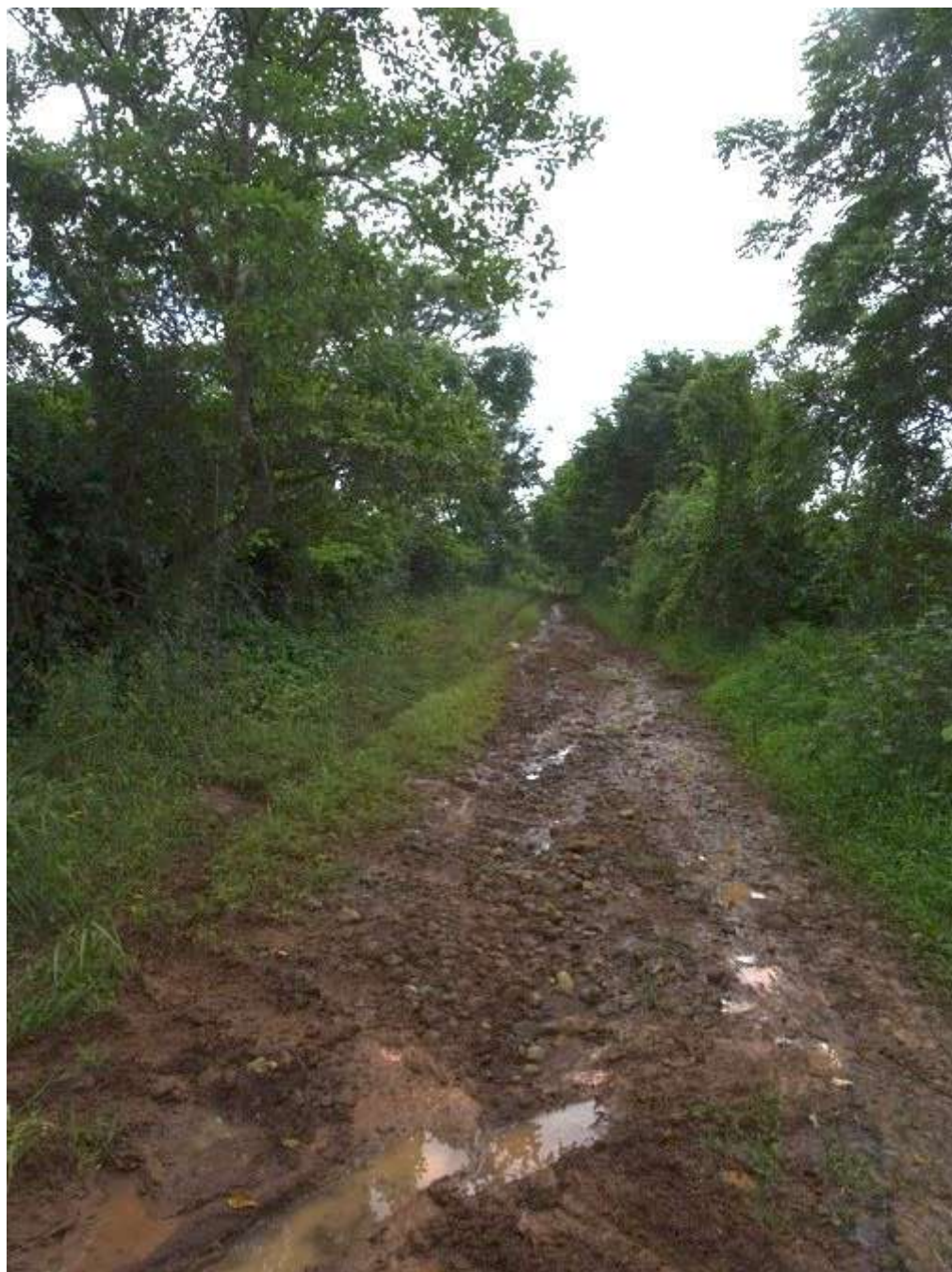


Foto 3. Camino de acceso al sondeo 7.

## 2.1 Introducción










Los sondeos eléctricos verticales son interpretados con base en el software RESIXP para cada sitio electo. Luego, cada SEV es integrado dentro de un perfil topográfico de acuerdo a la elección hecha para finalmente hacer una integración LIBRE, acreditando características geológicas con base en los rangos resistivos.












En resumen el proceso para obtener cada perfil, se ilustra en los siguientes 6 pasos:

1. Digitalización del SEV en el programa RESIXP.
2. Filtrado de los datos para obtener la resistividad calculada.
3. Interpretación y modelado de “n” capas donde la palabra “Prof.” es la profundidad máxima de la capa indicada.
4. Obtención del perfil topográfico usando la plataforma Google Earth.
5. Poner los resultados de cada SEV en el perfil.
6. Modelado tomando en cuenta los rasgos morfológicos básicos.
7. En el punto 3, para simplificar las descripciones, se agrupan 2 o 3 capas de un mismo material con rangos de resistividad no muy amplios en una misma capa para indicar una misma litología a una escala adecuada.

En los cuadros de cada SEV se indica la resistividad aparente y la calculada para determinar el modelo final; obviamente el valor resistivo del modelo final es diferente al valor reflejado en la resistividad calculada.

**Cuadro 3. Correlación geológica y simbología general del perfil P-1 y el perfil P-2.**

<b>CORRELACIÓN GEOLÓGICA Y SIMBOLOGÍA GENERAL</b>		
Capas	Correlación	Resistividad ohm-m
	Suelo / coluvios / epiclastos	Variable
	Piroclastos o epiclastos brechosos	20 - 450
	Piroclastos arcillosos	2.9 - 7.2
	Piroclastos indiferenciados (profundos)	17 - 19
	Lavas o brechas	35 - 1000
	Sondeos eléctricos verticales	
	Nivel estático	
	Variación lateral	
MQ-19 	Pozos	

<b>CORRELACIÓN GEOLÓGICA Y SIMBOLOGÍA GENERAL</b>		
Capas	Correlación	Resistividad ohm-m
	Suelo / coluvios / epiclastos	Variable
	Piroclastos o epiclastos brechosos	20 - 450
	Piroclastos meteorizados (someros)	9 - 19
	Piroclastos indiferenciados (profundos)	17 - 19
	Piroclastos arcillosos	2.9 - 7.2
	Lavas o brechas	35 - 1000
	Zona de alteración	
	Sondeos eléctricos verticales	
	Nivel estático	
MQ-19 	Pozos	
	Falla indiferenciada	

Estudio hidrogeológico para disponibilidad hídrica en la región Los Chiles, Alajuela.  
R – 042 – 2016.

## 2.2 Resultados del Perfil P-1 (SEV 1 y 2)

Los datos que a continuación se van a desplegar, tendrán la siguiente información en el orden indicado:

- Datos generales del sitio (Ubicación Lambert norte y territorial)
- Cuadro con los datos de campo con la resistividad aparente y calculada
- Modelo de capas paralelas y posible correlación geológica
- Curva de resistividad
- Foto del sitio
- Modelo geoelectrico del perfil

Es importante recalcar que estos modelos son resultados de una libre interpretación ajena a detalles geológicos locales y con el detalle topográfico que da la plataforma Google.



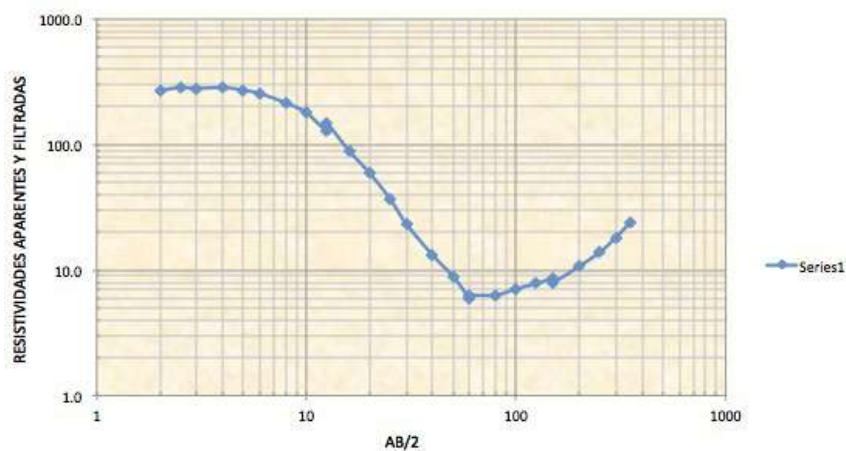
### 2.2.1 Resultados obtenidos en el sondeo SEV 1.

AB/2	Resistividad Aparente ( $\Omega$ -m)	Resistividad Calculada ( $\Omega$ -m)
2	271.3251	271.3251
2.5	285.392	285.392
3	281.2214	281.2214
4	285.114	285.114
5	272.1497	272.1497
6	255.1815	255.1815
8	215.1043	215.1043
10	179.256	179.256
12.5	128.4076	128.4076
12.5	148.9828	148.9828
16	89.1614	89.1614
20	59.5666	59.5666
25	37.1897	37.1897
30	23.2937	23.2937
40	13.1769	13.1769
50	8.9156	8.9156
60	5.9959	5.9959
60	6.3343	6.3343
80	6.3343	6.3343
100	7.0987	7.0987
125	7.827	7.827
150	8.5856	8.5856
150	7.9555	7.9555
200	10.7305	10.7305
250	13.8364	13.8364
300	18.2473	18.2473
350	24.0645	24.0645

**Cuadro 5. Datos de campo y filtrado del SEV 1, P-1**

Datos Generales	
Ubicación	317780 N 467327 W
Altura	40 m.s.n.m.
Sitio	Cantón: Los Chiles Distrito: Los Chiles Provincia: Alajuela

**Cuadro 4. Datos generales.**



**Figura 5. Curva de resistividad SEV 1, P-1.**



**Foto 4. Sitio del sondeo eléctrico.**

Modelo			
Capas	Resistividad (ohm m)	Prof. (m)	Correlación geológica
1	308.2	1.95	Suelos / coluvios / epiclastos
2	506.2	4.25	Suelos / coluvios / epiclastos
3	41.48	16.2	Piroclastos o epiclastos brechosos
4	3.63	71.33	Piroclastos arcillosos
5	17.2	99.54	Piroclastos indiferenciados (profundos)
6	1033.5		Lavas o brechas

**Cuadro 6. Modelo numérico del SEV 1, P-1.**

### 2.2.2 Resultados obtenidos en el sondeo SEV 2.

AB/2	Resistividad Aparente ( $\Omega$ -m)	Resistividad Calculada ( $\Omega$ -m)
2	264.0206	264.0206
2.5	279.737	279.737
3	295.2413	295.2413
4	310.7456	310.7456
5	303.2526	303.2526
6	283.9343	283.9343
8	262.3712	262.3712
10	253.4028	253.4028
12.5	249.9537	249.9537
12.5	239.0382	239.0382
16	237.324	237.324
20	208.257	208.257
25	163.1084	163.1084
30	121.5052	121.5052
40	63.0765	63.0765
50	43.0292	43.0292
60	29.4164	26.667
60	22.0579	25.2195
80	9.5856	11.1238
100	6.6075	8.5732
125	6.7316	8.2601
150	8.8982	9.5856
150	7.9326	10.1358
200	12.4374	12.4374
250	15.4616	15.4616
300	19.0787	19.0787
350	23.411	23.411

Cuadro 8. Datos de campo y filtrado del SEV 2, P-1.

Modelo			
Capas	Resistividad (ohm-m)	Prof. (m)	Correlación geológica
1	277.5	11.62	Suelos / coluvios / epiclastos
2	79.55	24.63	Piroclastos o epiclastos brechosos
3	4.2	81.13	Piroclastos arcillosos
4	19.12	104.6	Piroclastos indiferenciados (profundos)
5	435.1		Lavas o brechas

Cuadro 9. Modelo numérico del SEV 2, P-1.

Datos Generales	
Ubicación	317747 N 469969 W
Altura	64 m.s.n.m.
Sitio	Cantón: Los Chiles Distrito: Los Chiles Provincia: Alajuela

Cuadro 7. Datos generales.

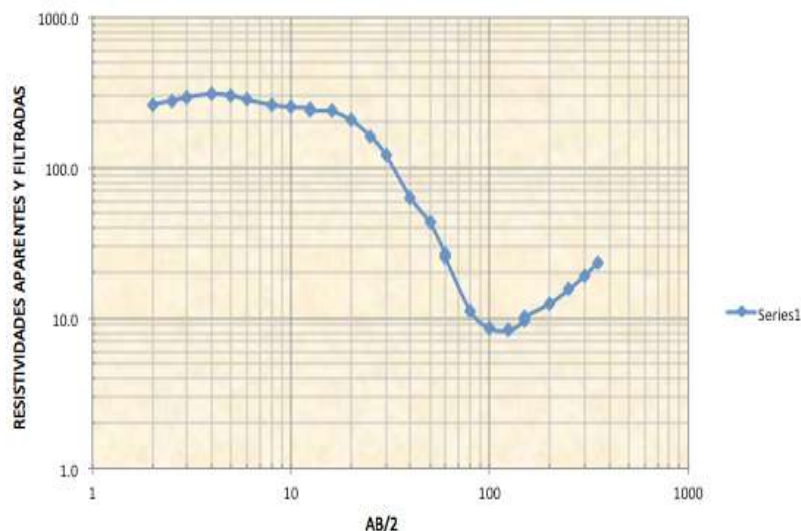
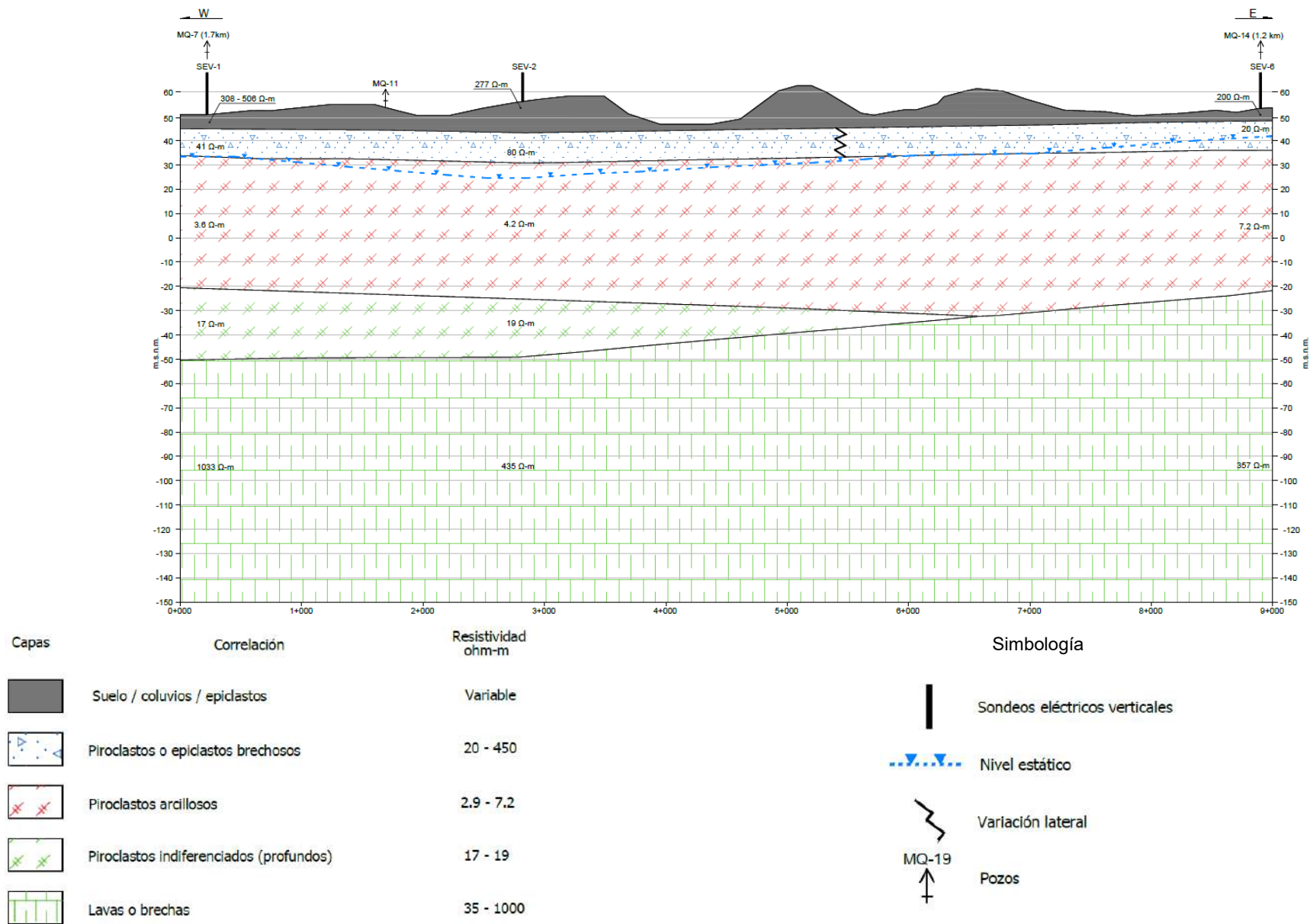


Figura 6. Curva de resistividad SEV 2, P-1.



Foto 5. Tendido de cable en la elaboración del sondeo.



**Figura 7. Resultados obtenidos en el perfil geoelectrico P-1.**

Estudio hidrogeológico para disponibilidad hídrica en la región Los Chiles, Alajuela.  
R – 042 – 2016.

### **2.3 Resultados del Perfil P-2 (SEV 8, 9 10, 5, 4, 3, 6, 7).**

Los datos que a continuación se van a desplegar, tendrán la siguiente información en el orden indicado:

- Datos generales del sitio (Ubicación Lambert norte y territorial)
- Cuadro con los datos de campo con la resistividad aparente y calculada
- Modelo de capas paralelas y posible correlación geológica
- Curva de resistividad
- Foto del sitio
- Modelo geoeléctrico del perfil

Es importante recalcar que estos modelos son resultados de una libre interpretación ajena a detalles geológicos locales y con el detalle topográfico que da la plataforma Google.

### 2.3.1 Resultados obtenidos en el sondeo SEV 8.

AB/2	Resistividad Aparente ( $\Omega$ -m)	Resistividad Calculada ( $\Omega$ -m)
2	183.2004	183.2004
2.5	181.3578	181.3578
3	165.7365	165.7365
4	155.9666	155.9666
5	149.6046	149.6046
6	162.0717	162.0717
8	182.4582	182.4582
10	188.0308	188.0308
12.5	174.9676	174.9676
12.5	165.2338	165.2338
16	162.0175	162.0175
20	148.6451	148.6451
25	125.8231	125.8231
30	95.9197	95.9197
40	54.5668	54.5668
50	26.5531	26.5531
60	20.2565	20.2565
60	18.88	18.88
80	10.5631	10.5631
100	6.656	6.656
125	5.5987	5.5987
150	5.5987	5.5987
150	5.5025	5.5025
200	4.9454	4.9454
250	5.0726	5.0726
300	5.4194	5.4194
350	7.5048	7.5048

Cuadro 11. Datos de campo y filtrado del SEV 8, P-2.

Modelo			
Capas	Resistividad (ohm-m)	Prof. (m)	Correlación geológica
1	183.8	1.2	Suelos / coluvios / epiclastos
2	230.5	12.05	Piroclastos o epiclastos brechosos
3	9.62	50.62	Piroclastos meteorizado (someros)
4	3.37	176	Piroclastos arcillosos
5	21.36		Lavas o brechas

Cuadro 12. Modelo numérico del SEV 8, P-2.

Datos Generales	
Ubicación	308347 N 471989 W
Altura	93 m.s.n.m.
Sitio	Cantón: Los Chiles Distrito: Los Chiles Provincia: Alajuela

Cuadro 10. Datos generales.

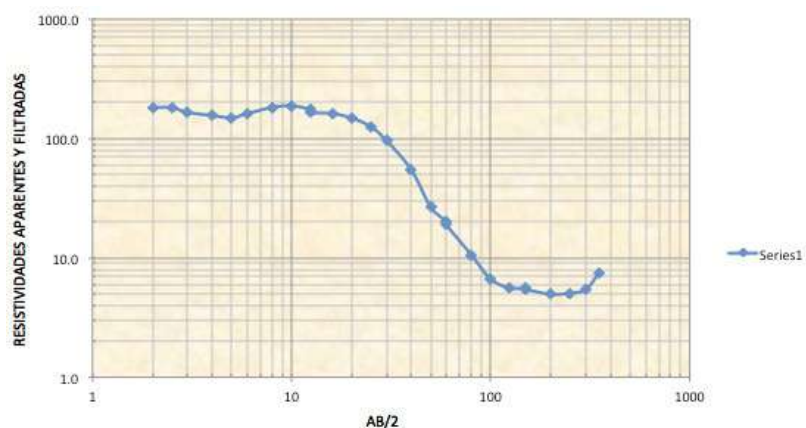


Figura 8. Curva de resistividad SEV 8, P-2.



Foto 6. Prospección del sondeo eléctrico.



### 2.3.2 Resultados obtenidos en el sondeo SEV 9.

AB/2	Resistividad Aparente ( $\Omega$ -m)	Resistividad Calculada ( $\Omega$ -m)
2	130.1842	130.1842
2.5	139.68	139.68
3	138.9888	138.9888
4	147.3567	147.3567
5	152.7926	152.7926
6	158.5899	158.5899
8	169.9405	169.9405
10	183.4553	183.4553
12.5	200.6491	186.1417
12.5	183.1892	171.1935
16	179.3597	179.3597
20	171.3106	171.3106
25	173.3206	142.7958
30	147.8198	117.4584
40	85.284	85.284
50	51.4185	51.4185
60	29.0926	29.0926
60	29.6561	29.6561
80	15.0919	15.0919
100	11.8035	11.8035
125	9.4136	9.4136
150	9.8876	8.5255
150	8.5255	8.5255
200	9.2064	9.2064
250	11.1135	10.5102
300	14.8969	11.9164
350	16.4252	13.3236

Cuadro 14. Datos de campo y filtrado del SEV 9, P-2

Modelo			
Capas	Resistividad (ohm-m)	Prof. (m)	Correlación geológica
1	123.3	3.47	Suelos / coluvios / epiclastos
2	289.8	12.95	Piroclastos o epiclastos brechosos
3	13.74	38.29	Piroclastos meteorizados (someros)
4	6.33	146.4	Piroclastos arcillosos
5	34.84		Lavas o brechas

Cuadro 15. Modelo numérico del SEV 9, P-2.

Datos Generales	
Ubicación	310225 N 473851 W
Altura	80 m.s.n.m.
Sitio	Cantón: Los Chiles Distrito: Los Chiles Provincia: Alajuela

Cuadro 13. Datos generales.

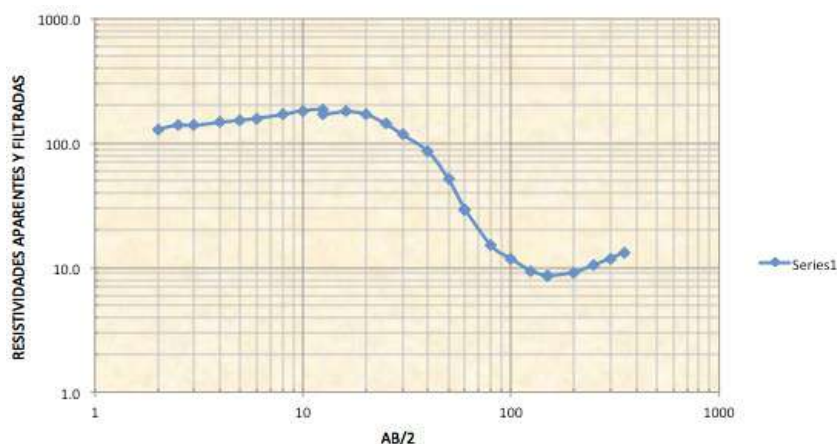


Figura 9. Curva de resistividad SEV 9, P-2.



Foto 7. Sitio del sondeo eléctrico.

### 2.3.3 Resultados obtenidos en el sondeo SEV 10.

AB/2	Resistividad Aparente ( $\Omega$ -m)	Resistividad Calculada ( $\Omega$ -m)
2	165.1749	165.1749
2.5	204.5247	204.5247
3	238.0348	238.0348
4	275.5145	275.5145
5	315.1494	315.1494
6	333.3532	333.3532
8	317.6494	324.1036
10	300.8492	312.2666
12.5	297.4939	279.2868
12.5	273.9576	284.531
16	219.1336	240.6673
20	172.8186	211.2822
25	146.6062	162.8375
30	124.0048	124.0048
40	67.4931	67.4931
50	44.6693	44.6693
60	24.4594	29.4083
60	30.4698	30.4698
80	15.0919	15.0919
100	11.197	11.197
125	10.8388	10.8388
150	11.1975	11.1975
150	10.9188	10.9188
200	15.8401	15.3356
250	20.9385	19.1712
300	27.6778	23.0909
350	33.9628	26.3024

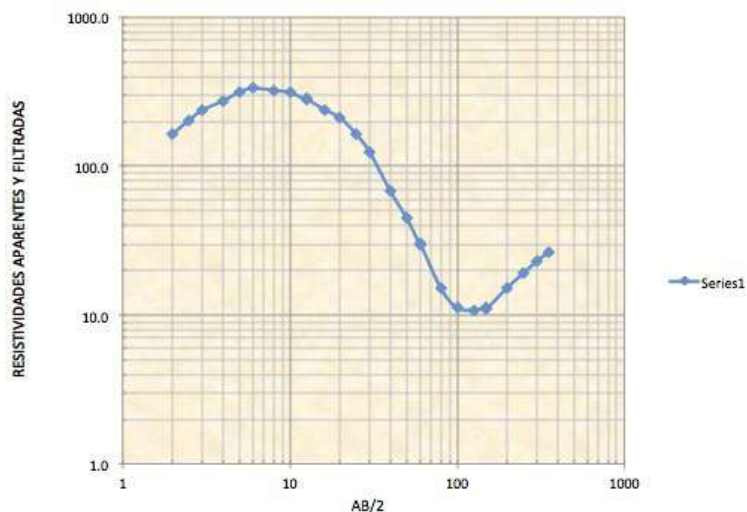
**Cuadro 17. Datos de campo y filtrado del SEV 10, P-2**

Modelo			
Capas	Resistividad (ohm-m)	Prof. (m)	Correlación geológica
1	795.1	3.93	Suelos / coluvios / epiclastos
2	129.3	20.37	Piroclastos o epiclastos
3	6.51	105.5	Piroclastos arcillosos
4	356.4		Lavas o brechas

**Cuadro 18. Modelo numérico del SEV 10, P-2.**

Datos Generales	
Ubicación	311008 N 474673 W
Altura	73 m.s.n.m.
Sitio	Cantón: Los Chiles Distrito: Los Chiles Provincia: Alajuela

**Cuadro 16. Datos generales.**



**Figura 10. Curva de resistividad SEV 10, P-2.**



**Foto 8. Labor de prospección en el sitio SEV 10.**

### 2.3.4 Resultados obtenidos en el sondeo SEV 3.

AB/2	Resistividad Aparente ( $\Omega$ -m)	Resistividad Calculada ( $\Omega$ -m)
2	159.1664	159.1664
2.5	180.2079	180.2079
3	187.0961	187.0961
4	203.568	203.568
5	206.9116	206.9116
6	212.6138	212.6138
8	235.7336	235.7336
10	239.7392	239.7392
12.5	239.1713	239.1713
12.5	244.9315	244.9315
16	223.7519	223.7519
20	205.241	205.241
25	174.5882	174.5882
30	163.8585	163.8585
40	119.0616	119.0616
50	96.4767	96.4767
60	90.1065	81.7222
60	78.1812	78.1812
80	49.1849	49.1849
100	27.9105	27.9105
125	15.5337	15.5337
150	16.1977	11.5885
150	12.7774	11.1135
200	9.362	9.362
250	9.9397	9.9397
300	11.2696	11.2696
350	13.4261	13.4261

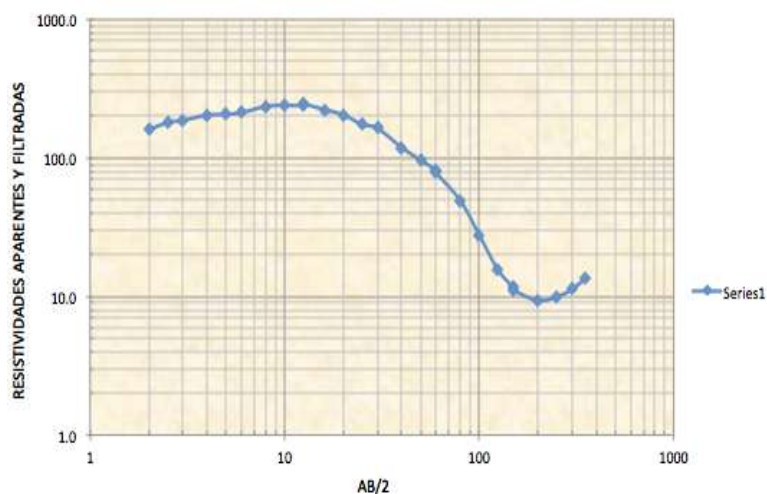
**Cuadro 20. Datos de campo y filtrado del SEV 3, P-2.**

Modelo			
Capas	Resistividad (ohm-m)	Prof. (m)	Correlación geológica
1	136	1.44	Suelo / coluvios / epiclastos
2	114.8	36.52	Piroclastos o epiclastos brechosos
3	5.47	150.3	Piroclastos arcillosos
4	44.66		Lavas o brechas

**Cuadro 21. Modelo numérico del SEV 3, P-2.**

Datos Generales	
Ubicación	315653 N 475971 W
Altura	63 m.s.n.m.
Sitio	Cantón: Los Chiles Distrito: Los Chiles Provincia: Alajuela

**Cuadro 19. Datos generales.**



**Figura 11. Curva de resistividad SEV 3, P-2.**



**Foto 9. Vista general del sitio prospectado.**

*Estudio hidrogeológico para disponibilidad hídrica en la región Los Chiles, Alajuela.*

*R – 042 – 2016.*



### 2.3.5 Resultados obtenidos en el sondeo SEV 4.

AB/2	Resistividad Aparente ( $\Omega$ -m)	Resistividad Calculada ( $\Omega$ -m)
2	90.0804	90.0804
2.5	92.988	92.988
3	95.6648	95.6648
4	100.2501	100.2501
5	107.3825	107.3825
6	109.5079	109.5079
8	124.5763	124.5763
10	141.3364	141.3364
12.5	160.9996	160.9996
12.5	150.528	150.528
16	169.746	169.746
20	191.3672	191.3672
25	199.2219	199.2219
30	198.609	198.609
40	178.9035	178.9035
50	127.2049	144.9368
60	122.4792	118.1158
60	109.5437	109.5437
80	72.7382	72.7382
100	42.6575	42.6575
125	30.3476	30.3476
150	18.3648	18.3648
200	12.2536	11.7622
200	14.6183	12.2081
250	9.2672	9.2672
300	6.3337	6.3337
350	5.9317	5.9317

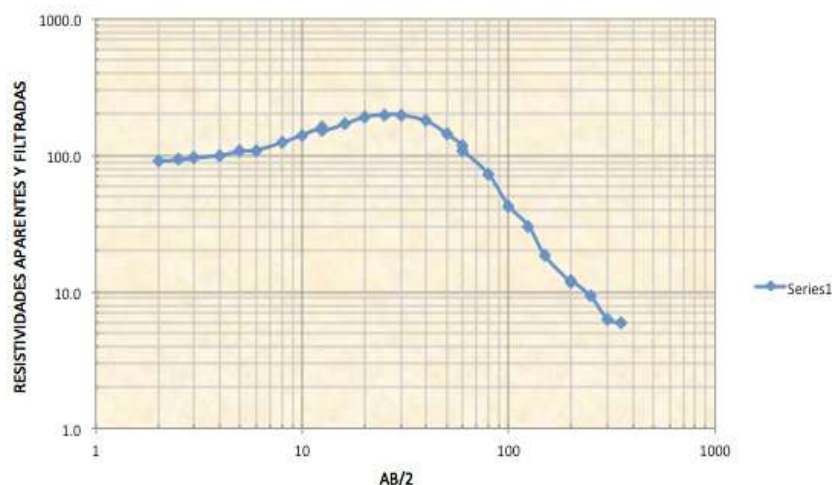
**Cuadro 23. Datos de campo y filtrado del SEV 4, P-2**

Modelo			
Capas	Resistividad (ohm-m)	Prof. (m)	Correlación geológica
1	80.5	3.9	Suelos / coluvios / epiclastos
2	458.2	17.34	Piroclastos o epiclastos brechosos
3	18.04	99.66	Piroclastos indiferenciados (profundos)
4	2.91	242.3	Piroclastos arcillosos
5	15.34		Lavas o brechas.

**Cuadro 24. Modelo numérico del SEV 4, P-2.**

Datos Generales	
Ubicación	313194 N 475971 W
Altura	64 m.s.n.m.
Sitio	Cantón: Los Chiles Distrito: Los Chiles Provincia: Alajuela

**Cuadro 22. Datos generales.**



**Figura 12. Curva de resistividad SEV 4, P-2.**



**Foto 10. Labor de prospección.**

*Estudio hidrogeológico para disponibilidad hídrica en la región Los Chiles, Alajuela.*

*R – 042 – 2016.*

### 2.3.6 Resultados obtenidos en el sondeo SEV 5.

AB/2	Resistividad Aparente ( $\Omega$ -m)	Resistividad Calculada ( $\Omega$ -m)
2	108.0352	99.3508
2.5	104.3736	104.3736
3	92.6562	96.6168
4	97.2317	106.5292
5	110.5706	110.5706
6	114.899	114.899
8	120.9511	120.9511
10	118.0206	118.0206
12.5	117.8703	117.8703
12.5	122.4792	122.4792
16	118.662	118.662
20	106.3151	106.3151
25	98.6543	98.6543
30	96.6487	96.6487
40	73.2161	73.2161
50	45.9264	45.9264
60	31.2064	31.2064
60	31.1735	31.1735
80	18.9416	18.9416
100	12.2545	12.2545
125	9.5323	9.5323
150	7.4986	7.4986
150	7.8409	7.8409
200	7.8409	7.8409
250	9.5323	9.5323
300	11.5885	11.5885
350	14.6905	14.6905

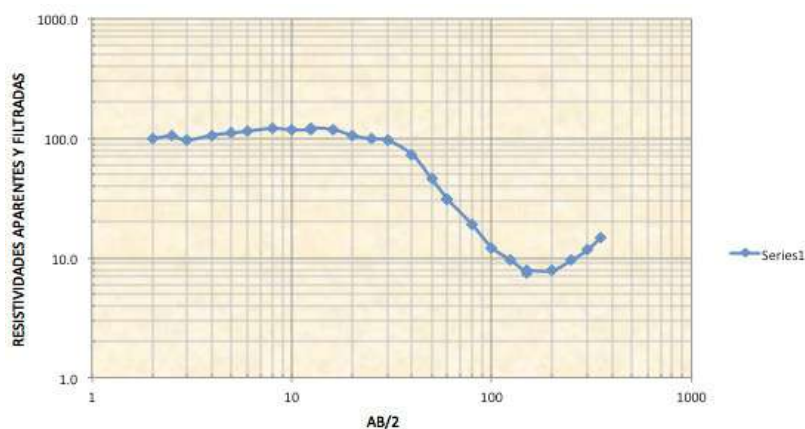
**Cuadro 26. Datos de campo y filtrado del SEV 5, P-2.**

Capas	Resistividad (ohm-m)	Modelo	
		Prof. (m)	Correlación geológica
1	103.1	1.48	Suelo / coluvios / epiclastos
2	132.5	21.64	Piroclastos o epiclastos brechosos
3	6.2	151.4	Piroclastos arcillosos
4	44.24		Lavas o brechas

**Cuadro 27. Modelo numérico del SEV 5, P-2.**

Datos Generales	
Ubicación	312493 N 473758 W
Altura	57 m.s.n.m.
Sitio	Cantón: Los Chiles Distrito: Los Chiles Provincia: Alajuela

**Cuadro 25. Datos generales.**



**Figura 13. Curva de resistividad. SEV 5, P-2.**



**Foto 11. Labor de prospección.**

### 2.3.7 Resultados obtenidos en el sondeo SEV 6.

AB/2	Resistividad Aparente ( $\Omega$ -m)	Resistividad Calculada ( $\Omega$ -m)
2	259.1902	259.1902
2.5	268.0499	268.0499
3	246.7491	246.7491
4	271.457	271.457
5	245.8679	245.8679
6	242.4897	242.4897
8	241.742	241.742
10	209.2155	209.2155
12.5	205.8442	205.8442
12.5	200.704	200.704
16	175.4954	175.4954
20	163.6197	163.6197
25	131.7782	131.7782
30	103.453	103.453
40	57.3661	57.3661
50	29.6551	29.6551
60	21.3396	18.0431
60	18.7481	18.7481
80	9.075	9.075
100	7.5265	7.5265
125	7.3162	7.3162
150	8.8982	8.8982
150	8.6269	8.6269
200	13.1867	11.4577
250	19.2194	15.9777
300	28.6044	19.0787
350	36.7706	22.1402

Cuadro 29. Datos de campo y filtrado del SEV 6, P-2.

Modelo			
Capas	Resistividad (ohm-m)	Prof. (m)	Correlación geológica
1	262.5	2.71	Suelos / coluvios / epiclastos
2	211.6	15.89	Piroclastos o epiclastos brechosos
3	3.63	75	Piroclastos arcillosos
4	900.1		Lavas o brechas

Cuadro 30. Modelo numérico del SEV 6, P-2.

Datos Generales	
Ubicación	317687 N 477003 W
Altura	47 m.s.n.m.
Sitio	Cantón: Los Chiles Distrito: Los Chiles Provincia: Alajuela

Cuadro 28. Datos generales.

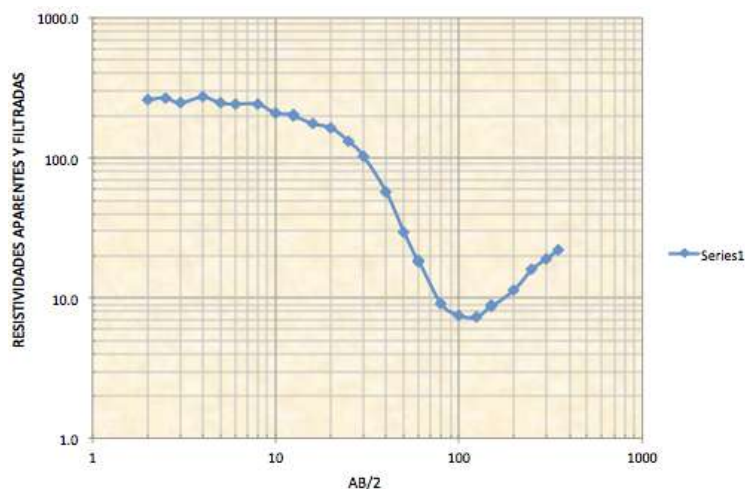


Figura 14. Curva de resistividad. SEV 6, P-2.



Foto 12. Vista general del sitio prospectado.



### 2.3.8 Resultados obtenidos en el sondeo SEV 7.

AB/2	Resistividad Aparente ( $\Omega$ -m)	Resistividad Calculada ( $\Omega$ -m)
2	188.0307	188.0307
2.5	190.1985	190.1985
3	186.8212	186.8212
4	193.4737	193.4737
5	173.165	173.165
6	160.9485	160.9485
8	125.778	125.778
10	100.7218	100.7218
12.5	68.7128	76.2155
12.5	78.9267	78.9267
16	43.2989	48.0932
20	23.7663	27.9105
25	16.2869	18.3648
30	12.5081	14.0883
40	11.3707	11.3707
50	10.7285	10.7285
60	10.854	10.854
60	10.4819	10.4819
80	11.2392	11.2392
100	12.7727	12.7727
125	15.9302	15.3184
150	18.1213	18.1213
150	18.1036	18.1036
200	25.9597	25.9597
250	35.8787	35.8787
300	48.0932	48.0932
350	56.0708	56.0708

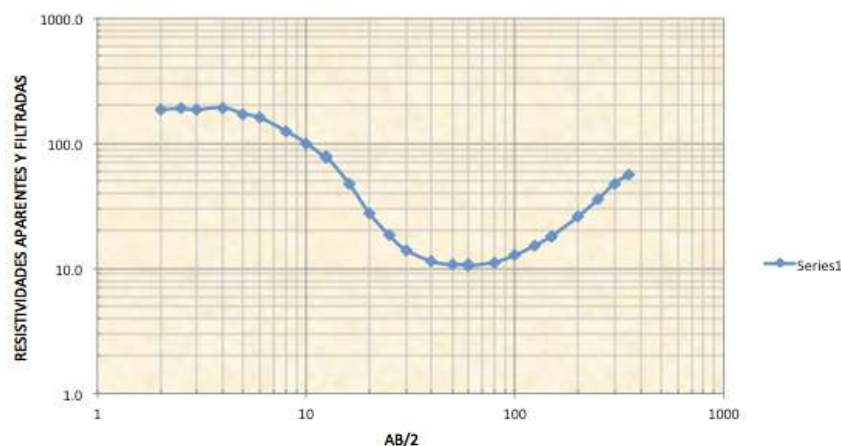
**Cuadro 32. Datos de campo y filtrado del SEV 7, P-2.**

Modelo			
Capas	Resistividad (ohm-m)	Prof. (m)	Correlación geológica
1	198.7	5.01	Suelos / coluvios / epiclastos
2	19.14	13.91	Piroclastos o epiclastos brechosos
3	7.23	60.45	Piroclastos arcillosos
4	357.4		Lavas o brechas

**Cuadro 33. Modelo numérico del SEV 7, P-2.**

Datos Generales	
Ubicación	318317 N 474078 W
Altura	43 m.s.n.m.
Sitio	Cantón: Los Chiles Distrito: Los Chiles Provincia: Alajuela

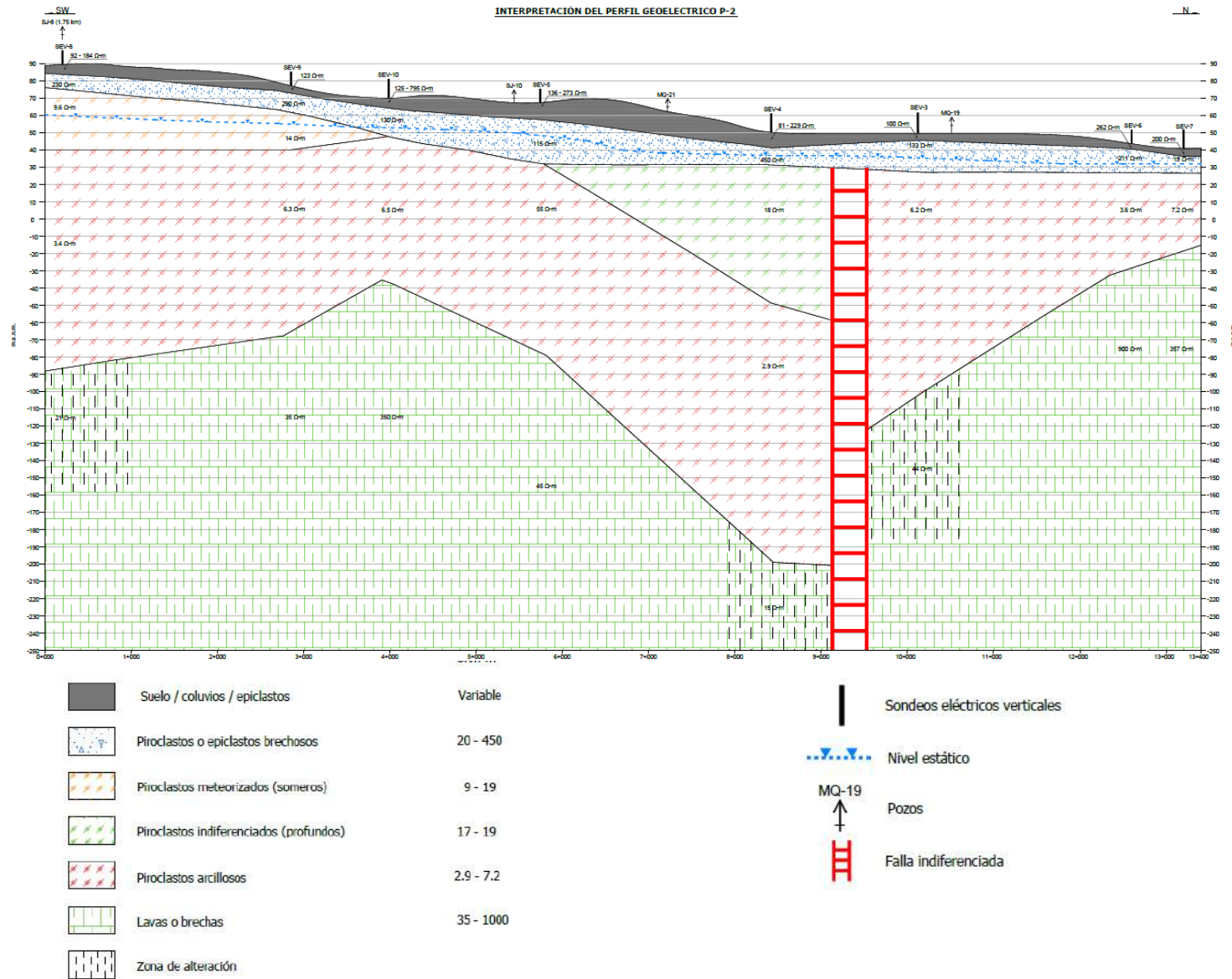
**Cuadro 31. Datos generales.**



**Figura 15. Curva de resistividad SEV 7, P-2.**



**Foto 13. Vista del sitio del sondeo.**



**Figura 16. Resultados obtenidos en el perfil geoelectrico P-2.**

Estudio hidrogeológico para disponibilidad hídrica en la región Los Chiles, Alajuela.  
R - 042 - 2016.

### 3. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

#### **Perfil P-1**

Muestra 5 capas gobernadas principalmente por depósitos de materiales volcánicos. Bajo la capa de suelos coluvios se tiene una capa resistiva que se correlaciona con productos brechosos con un espesor promedio de 15 metros; esta capa es subyacida por un grueso paquete de materiales arcillosos de hasta 60 metros de profundidad. El basamento se correlaciona con lavas o brechas con valores resistivos altos.

#### **Perfil P-2**

Este perfil al igual que el perímetro está conformado por una secuencia de productos volcánicos con un basamento correlacionado con lavas o brechas. Como rasgo relevante, se nota un desplazamiento de la estratigrafía entre los sondeos SEV 3 y SEV 4, lo cual se correlaciona con una posible falla, además se nota un suave buzamiento del nivel estático hacia el sector norte.

#### 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Introducción a los Métodos Geofísicos de Exploración, Universidad Nacional Autónoma de México. Autor Enrique de Valle Toledo, 1986.
- Introduction To . Geophysical Prospecting. Autores Milton B. Dobrin , Carl H. Savit, 1988.
- Manual de Geología de Costa Rica., Volumen 1: Estratigrafía .Autor: Peter Sprechmann, 2000.
- Reynolds Jenny. Manejo Integrado de Aguas Subterráneas un reto para el futuro. Costa Rica: Editorial Universidad Estatal a Distancia, 2002.

#### ***Personal Profesional Involucrado***

Carlos Leandro Montoya, Geofísico

#### ***Personal de apoyo***

Katherine Trigueros Miranda, Dibujante

Gabriela León González, Secretaria.

Eduardo Álvarez Barrantes. Asistente

Greivin Moya Acuña, Operador.

Junior Moya Sánchez, Asistente de operador.

Víctor Loria Hernández, Asistente de operador.

**ANEXO 4: Protocolo de muestreo**



HOJA DE CAMPO PARA MUESTREO DE AGUA				PROYECTO 802-B2-515	
Número de muestra:			Ubicación:		
Objetivo del muestreo:			Coordenadas		
Técnico responsable:			X:	Y:	Z:
Fecha:		Hora inicio:		Hora Final:	
Observaciones (Indicar condiciones de muestreo, metodología, purga, etc.):					
<b>PUNTO DE MUESTREO</b>					
Tipo (manantial, río o pozo):			Esquema:		
Diámetro:					
Nivel del agua (m)					
Inicial:	Final:	Ref.:			
Profundidad total:					
Prof. de la rejilla:					
Litología captada:					
Uso del agua:					
Presencia actividades contaminantes:					
Observaciones:					
<b>PURGA</b>					
Método de purga:					
Vol. H <sub>2</sub> O en pozo:		Vol. H <sub>2</sub> O purgada:		Caudal purga:	
Estabilización de los parámetros					
1-Temp °C:	1-C.E:	1-pH:	1-Eh:		
2-Temp °C:	2-C.E:	2-pH:	2-Eh:		
3-Temp °C:	3-C.E:	3-pH:	3-Eh:		
4-Temp °C:	4-C.E:	4-pH:	4-Eh:		
5-Temp °C:	5-C.E:	5-pH:	5-Eh:		
Observaciones:					
<b>PARÁMETROS DE CAMPO</b>					
Temperatura:		C.E:		PH:	
Eh:		O.D:		Alcalinidad:	
Observaciones					
<b>MUESTREO</b>					
Prof. Muestra de referencia (m):			Tipo embase y volumen:		
Método de muestreo:			Muestra filtrada (Si/No):		
Muestreador (Bailer):			Preservantes (Si/No/cuales):		
Boca de pozo (bomba de extracción):					
Muestreo discreto con bomba:			Nº de embases:		
Observaciones:					
<b>ANÁLISIS REQUERIDOS</b>					
INORGANICOS					
Iones mayoritarios:		Metales pesados:			
As (T):					
TOC:					
Isótopos estables:					
Observaciones:					

## PROTOCOLO DE MUESTREO

### Antes de ir al campo:

- 1- Planificación de los parámetros que se desean analizar
- 2- Programación de los puntos de muestreo
- 3- Recopilación de información hidrogeológica del entorno del área de muestreo
- 4- Revisión, verificación del equipo y calibrado de las sondas o instrumentos de medida
  - Inspeccionar de forma visual el estado de los aparatos
  - Verificar el funcionamiento de los aparatos de medida
  - Comprobar la carga de las baterías y traer baterías de recambio
  - Material para la purga (bomba de purga y accesorios como tubos, cables, enchufes, trípode, alimentador de la bomba)
  - Material para el muestreo (sonda de nivel, muestreador y rodete con cuerda, recipientes, etiquetas, conservantes para la muestra, neveras, acumuladores, embudo, filtro, membranas para la filtración de muestras, recipiente para cuantificar el caudal de muestreo, cronómetro)
  - Disponer de: GPS, cámara fotográfica, bolígrafo, hojas de campo, cinta métrica, cinta aislante, tijeras, bolsas de plástico, embase para residuos)
  - Instrumentos de medida de los parámetros de campo (Termómetro, conductímetro, pH-metro con soluciones de calibrado para PH 4,7 y 10 y vaso de precipitación, papel de pH, medidor de oxígeno disuelto, medidor de potencial redox Eh, Turbidímetro, envase o celda cerrada de circulación de agua para realizar las medidas, agitador de campo, recambios y estándares de calibrado para los distintos instrumentos)
  - Equipo de limpieza (detergente sin fosfatos, cepillos, envases para preparar la solución de limpieza, agua destilada, papel para secar)

El equipo de muestreo tiene que ser inerte a los parámetros analizados, por lo que se tendrá en cuenta según los parámetros deseados.

- Parámetros orgánicos: Se recomienda vidrio o borosilicato, aunque si no hay corrosión también se puede usar hierro, cobre, aluminio, acero galvanizado, acero inoxidable. En algunos casos se puede usar teflón aunque este puede presentar sorción de algunos orgánicos.
- Parámetros inorgánicos: Se recomienda polipropileno, polietileno y PVC. También se puede usar teflón pero teniendo en cuenta que es una fuente potencial de F,

Silicona teniendo en cuenta que es una fuente potencial de Si, acero inoxidable teniendo en cuenta que es una fuente potencial de Cr, Ni, Fe, Mn y Mo y vidrio teniendo en cuenta que es una fuente potencial de B y Si. Se usan tubos de cobre y aluminio para el muestreo de tritio.

### **En el campo:**

- 1- Inspección del pozo y de la zona colindante
- 2- Medición del nivel freático (importante limpiar la sonda para evitar contaminación de otros pozos)
- 3- Medición de la profundidad total del pozo (por si es necesario calcular el volumen de agua dentro del pozo)
- 4- Purga del pozo. Se puede realizar de distintas formas aunque se recomienda una purga hasta estabilización de los parámetros de campo.
  - Extracción de 3 o 4 veces el volumen de agua contenida en el pozo
  - Inicio de bombeo i espera hasta estabilización de los parámetros de campo. Se medirán los parámetros cada 2 minutos y se considerarán estabilizados después de tres lecturas consecutivas constantes.
  - Bombeo a cabal predeterminado durante un tiempo prescrito. El caudal y tiempo son función de las características hidrodinámicas que se pueden conocer por estudios previos.
  - Bombeo de bajo caudal delante del tramo ranurado para renovar el agua en esta zona
- 5- Muestreo:
  - Orden de los distintos pozos: Si hay que muestrear varios pozos se recomienda hacerlo del menos al más contaminado y en caso de no conocerse, empezar por los pozos situados aguas arriba.
  - Limpiar el material con agua destilada antes de muestrear
  - El muestreo se realizará con el mínimo caudal posible para evitar el efecto de turbulencia
  - Orden de muestreo según parámetros:
    1. DNAPL y LNAPL
    2. Parámetros de campo (Temperatura, PH, Eh, Conductividad eléctrica, Oxígeno disuelto, Alcalinidad)
      - Las medidas se efectuarán en continuo introduciendo un vaso en la salida de la bomba o grifo de derivación e introduciendo los sensores directamente en el vaso mientras este derrama y evitando el burbujeo dentro del vaso.

- Si no se pueden realizar las medidas en continuo, hay que intentar realizarlas en un embase atérmico que se habrá llenado y vaciado varias veces, antes de la medición, con agua del pozo para poder igualar la temperatura del vaso a la del agua subterránea.
- Las medidas se intentará tomarlas en una zona dónde dé la sombra
- Proteger los electrodos del polvo y del sol.
- Se limpiaran los electrodos después de cada medida y se guardaran en condiciones optimas de humedad.
- TEMPERATURA: Se mide con termómetro de mercurio o con el termómetro del PHímetro o el conductímetro. Importante dejar que se alcance el equilibrio térmico entre el termómetro y el agua.
- PH: Se mide con el PHímetro. Este requiere de un calibrage diario con dos patrones dentro del rango de las medidas que se prevén hacer. Si la medida no es en continuo es necesario realizar una pequeña agitación con pequeños golpes o usar un agitador portátil. Después de cada medida hay que limpiar el PHímetro.
- POTENCIAL REDOX (Eh): Se mide introduciendo el electrodo en el vaso. Hay que esperar a la estabilización de la lectura. Las medidas registradas hay que corregirlas respecto al electrodo de referencia.
- CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA: Se mide con el conductímetro. Se introduce el electrodo en el interior del vaso con agua y se toma la medida, una vez estabilizada, junto con la temperatura. Una vez realizada la medida limpiar el electrodo con agua destilada.
- OXÍGENO DISUELTO: Muchas de las sondas requieren un flujo continuo de agua a través de la membrana del aparato por lo que la medida se realizará en continuo o provocando una ligera agitación dentro del vaso.
- ALCALINIDAD: Medición con una valoración de la muestra con un ácido fuerte.

3. VOCs (Recipiente de cristal)

4. Hidrocarburos (Recipiente cristal)

5. Pesticidas (Recipiente cristal)

6. Metales (Recipiente polietileno): Los protocolos conviene filtrar el agua antes de tomar la muestra. Hay que especificar si se quiere medir los metales totales (sin filtrar pero acidificado), los disueltos (filtrado y acidificado) o los solubles (acidificado y filtrado). Antes del muestreo limpiar el recipiente con agua de muestreo. Al adicionar el ácido evitar el contacto del cuentagotas con la parte interior o el cuello del embase de muestreo.

7. Inorgánicos (Recipiente polietileno). Rellenar totalmente el embase con la mínima agitación posible.
  8. Microbiológicos (Recipiente esterilizado): Rellenar solo hasta el cuello de la botella, usar muestreador esterilizado, evitar aireación.
  9. Nueva medida de nivel freático
    - Necesario etiquetar correctamente todos los embases. En la etiqueta se indicará fecha i hora de la toma de muestra, referencia de la muestra, Sitio de recolección y petionario.
- 6- Filtración: Se recomienda filtración directa o in situ mediante membrana de 0,45  $\mu\text{m}$  de diámetro de poro sometida a una presión no superior a 35 m de columna de agua. Para filtración con membrana adosada a la salida de la bomba, se recomienda filtrar 150 ml antes de tomar la muestra. Si el filtrado es después de recoger la muestra hay que hacerlo rápidamente. Evitar filtración en vacío para no agitar o airear la muestra.
- Cationes y metales pesados: Se filtran y acidifican a un  $\text{PH} < 2$  con ácido nítrico
  - Aniones: Se filtran solamente
  - Nitratos: Se filtran y acidifican a  $\text{PH} < 2$  con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  o se preservan con un agente antibacterial
- 7- Condicionamiento de las muestras: Poner las muestras en la nevera justo después de tomarlas para mantenerlas por debajo de los  $4^\circ\text{C}$ .

## ANEXO 5: Información de pozos

Pozo	Coordenadas CRTM-05		Prof. (m)	N.E. (m)	N.D. (m)	Rejilla (m)	Litología	Caudal (l/s)	Uso	T (m <sup>2</sup> /d)	K (m/d)
<b>MQ-1</b>	427120	1199732	52	12.48	13.9 6	34.3-46	Tobas de color café y gris	2.52	Abastecimiento Publico	170.3	12.1
<b>MQ-4</b>	429556	1205279	42	15	20	24-42	Toba de color gris con fragmentos volcánicos	2	Doméstico-Riego	40	2.35
<b>MQ-5</b>	431117	1205578	43	20	23	25-43	Tobas arenosas con fragmentos volcánicos	5	Doméstico-Riego	166.6 6	9.80
<b>MQ-7</b>	430050	1203679	43	19	31	31-43	Tobas arenosas con fragmentos volcánicos	3	Doméstico	25	2.77
<b>MQ-10</b>	429775	1203729	43	21	Ni	25-43	Tobas arenosas con fragmentos volcánicos	3	Riego		
<b>MQ-11</b>	433475	1203825	78	29	42	60-78	tobas arenosas con fragmentos volcánicos	4.72	Doméstico	36.3	1.81
<b>MQ-12</b>	431972	1201827	46	14	Ni	29-46	Tobas	2.2	Doméstico-Riego		
<b>MQ-13</b>	429775	1204129	62	14.3	19.0 8	30-42 54-62	Tobas	3.8	Doméstico-Riego	79.5	7.95

Pozo	Coordenadas CRTM-05		Prof. (m)	N.E. (m)	N.D. (m)	Rejilla (m)	Litología			Caudal (l/s)	Uso	T (m <sup>2</sup> /d)	K (m/d)
<b>MQ-14</b>	434473	1202374	80	10	Ni	52-80	Toba	arenosa	de	20	Varios		
								color negro					
<b>MQ-15</b>	441776	1205415	45	Ni	Ni	23-26 35-42	Toba	arenosa		9.5	Abastecimiento Público		
<b>MQ-18</b>	428828	1206330	50	9	48	18-50	Tobas	arenosas	con	3.8	Varios	9.74	0.48
								fragmentos volcánicos					
<b>MQ-19</b>	439573	1201818	74	Ni	Ni	63-72	Toba	arenosa	negra	9.5	Abastecimiento Público		
<b>MQ-21</b>	438360	1200139	87.5	22	35	51-81	Tobas	arenosas	con	10	Doméstico-Riego	76.9	2.56
								fragmentos volcánicos					
<b>MQ-22</b>	428538	1198071	72	26.13	33.8 4	48-60	Toba	arenosa	de	4.5	Abastecimiento Público	58.3*	2.24*
								color negro					
<b>MQ-25</b>	429397	1204815	61	15	21.8 2	50-56	Toba	arenosa	de	3	Agro. Industrial	20.6	0.57
								color negro					
<b>MQ-31</b>	426441	1200708	60	2.17	20.8	30-60	Brechas	lávicas		5	Riego	98.8*	3.29*
<b>MQ-37</b>	431868	1198227	76	7	23.5	35-76	Toba			3	Agro. Industrial	10.5*	0.26*
<b>SJ-8</b>	437308	1197614	65	31.43	36.3 9	45-60	Toba	arenosa	de	6.5	Abastecimiento Público	131	6.89
								color negro					

Pozo	Coordenadas		Prof.	N.E.	N.D.	Rejilla	Litología			Caudal	Uso	T	K
	CRTM-05		(m)	(m)	(m)	(m)				(l/s)		(m <sup>2</sup> /d)	(m/d)
<b>SJ-9</b>	434264	1194625	80	5	45	38-72	Toba	arenosa	de	10	Riego	25	0.73
							color negro						
<b>SJ-10</b>	437025	1197637	66	15	55	30-58	Toba	arenosa	de	10	Riego	25	0.89
							color negro						
<b>SJ-12</b>	436760	1190422	40	Ni	Ni	26-29	Toba	arenosa		4	Abastecimiento		
							compacta				Público		



Anexo 6: Datos físico químicos de las muestras de agua

MUESTREO DE EPOCA SECA																															
No.	Fecha	Localidad	pH	Temp. (°C)	O.D (mg/l)	C.O.T (mg/l)	C.E (uS/cm)	Eh (V)	Alcalinidad (mg/l)	T.D.S (mg/l)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)	Mn (ug/L)	Fe (ug/L)	NH4 (mg/L)	Ba2+ (mg/L)	F- (mg/L)	Cl- (mg/L)	SO4 (mg/L)	HCO3 (mg/L)	CO3 2- (mg/L)	NO2 (mg/L)	NO3- (mg/L)	Al (mg/L)	As ug/L	SiO2 (mg/L)	Cationes	Aniones	Balance
1	01/25/2016	San José (MQ-1)	6,5	27,1	1,39	0,325	166	652,6	76	58	10,2	3,6	4,4	16,1	0,00764	0,00662	0,0001	0,1446	0,12	2,17	0	111,5	3,5	0,0061	0,62	0,00142	4,43	43,8	1,701173	-2,02687	8,736479
2	01/25/2016	Pavón Pozo 2 (SC)	4,7	26,8	1,9	0,279	30	330,5	76	58	10,8	3,2	3,4	17,7	0,0456	0,0201	0,03	0,0502	0,16	2,24	0	7,88	3,5	0,0061	0,63	0,0102	0,166	12,59	1,716272	-0,33227	67,56003
3	01/25/2016	Pavon Pozo 3(SC)	6,5	26,6	0,8	0,225	172,6	252,8	4	6	0	0	1	1	0,0412	0,00402	0	0,108	0	2,07	2,98	104,8	3,5	0,0061	0,72	0,0122	1,97	47,9	3,788589	-1,97414	31,48593
4	01/26/2016	Tremedal (MQ-25)	6,91	26,9	0,25	0,425	215	174	98	66	15,4	3,7	4,9	18,5	0,00188	0,0036	0	0,108	0,1	1,87	0	131,5	3,5	0,0061	0,3	0,00343	9,65	16,05	2,090812	-2,33929	5,608928
5	01/26/2016	Tremedal (INV-216)	5,93	27	0,4	0,278	92,8	126,1	35	30	5,9	2	2,4	8,1	0,00195	1,939	0	0,0454	0,13	2,28	2,08	43,62	3,5	0,0112	1,13	0,00215	1,85	24,5	0,866139	-0,96979	5,645682
6	01/26/2016	La Virgen (MQ-11)	7,6	26,8	0,21	0,504	228	-13,3	103	50	26,4	4,5	3,9	13,7	0,057	0,00551	0,284	0,0322	0	2,11	0	141,8	3,5	0,0061	0,32	0,0049	9,42	19,5	2,283681	-2,51328	4,78642
7	01/27/2016	San Antonio (SANT)	6,97	26,6	0,97	0,424	216	273,8	92	85	10,5	3,9	7,8	21	0,00909	0,00437	0,03	0,0596	0	3,58	0	125,4	3,5	0,006	0,92	0,0026	4,8	35,7	2,247795	-2,30131	1,176439
8	01/27/2016	Gallito (MQ-22)	6,27	27,3	0,37	0,38	139,2	59	59	54	10	3,5	5,4	12,9	0,1144	0,0993	0,03	0,0658	0,15	2,29	0	80,57	3,5	0,006	0,92	0,0009	4,38	46	1,614155	-1,52952	2,692221
10	01/27/2016	Vasconia (VASC)	6,01	26,5	2,03	0,301	105,8	220,2	45	46	6,4	3,1	6,4	8,1	0,00212	0,0087	0,03	0,143	0	1,99	0	61,18	3,5	0,0091	0,89	0,00331	1,259	42,1	1,290073	-1,19743	3,724518
11	01/27/2016	Cobano (SJ-10)	6,01	26,4	0,98	0,416	112,4	51,4	43	42	7,4	2,3	4,4	9,7	0,0809	1,094	0,0436	0,0549	0,1	1,91	0	59,37	3,5	0,0061	0,32	0,00641	0,796	21,3	1,229167	-1,15883	2,94559
12	01/28/2016	Las Nubes (MQ-15)	7,77	27,35	3,2	0,459	219	0	111	83	22,7	4,4	8,8	18,5	0,452	0,0325	0,137	0,12	0	1,98	0	139,3	3,5	0,0138	1,92	0,00289	15,73	28,9	2,754694	-2,49395	4,967761
13	01/28/2016	Cristo Rey (MQ-19)	7,86	28,4	0,24	0,392	169	0	84	28	35	3,2	2	8,1	0,031	0,0472	0,3667	0,0344	0	1,72	0	99,3	3,5	0,01	0,67	0,00565	9,88	9,95	2,193324	-1,80994	9,576887
14	01/28/2016	Santa Cecilia (MQ-12)	7,81	27,35	0,32	0,422	211	0	105	83	17,1	4,6	5,4	24,2	0,47	0,053	0,2566	0,0609	0	2	0	158,7	3,5	0,006	0,25	0,00536	4,62	19,4	2,527581	-2,78559	4,856001
MUESTREO DE EPOCA LLUVIOSA																															
No.	Fecha	Localidad	pH	Temp	O.D mg/L	C.O.T mg/L	C.E (uS/cm)	Eh (V)	Alcalinidad (mg/l)	T.D.S (mg/l)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Mg (mg/L)	Ca (mg/L)	Mn (ug/L)	Fe (ug/L)	NH4 (mg/L)	Ba2+ (mg/L)	F- (mg/L)	Cl- (mg/L)	SO (mg/L)	HCO3 (mg/L)	CO3 2- (mg/L)	NO2 (mg/L)	NO3- (mg/L)	Al (mg/L)	As ug/L	SiO2 (mg/L)	Cationes	Aniones	Balance
1	10/25/2016	San José (MQ-1)	7,16	27,3	0,15	0	163	-538,5	87	60	11,8	4	4,9	16,1	0,000071	0	0	0	0	0	0	111,5	0	0	0	0,002935	2	0	1,822128	-1,82727	0,140893
2	10/25/2016	Pavón Pozo 2 (SC)	6,99	26,7	0,89	0	162,2	331,2	89	60	11,3	3	4,9	16,1	0	0	0	0	0	1,93	0	7,88	0	0	0	4,8	0	0	1,774804	-0,191	80,56803
3	10/25/2016	Pavon Pozo 3(SC)	5,59	26,9	0,34	0	29,9	394,2	4	20	0	0	1	6,4	0,000444	0,000283	0	0	0	1,93	2,6	104,8	0	0	0	0,000863	0	0	0	-1,83346	0
4	10/26/2016	Tremedal (MQ-25)	6,33	27,3	2,66	0	56,5	-229,5	19	16	5,8	0	1	4,8	0	0	0	0	0	2,75	0	131,5	0	0	0	0,031682	0	0	0,574087	-2,24317	59,24499
5	10/26/2016	Tremedal (INV-216)	6,66	27,7	2	0	82,8	17	35	30	6,5	2	3,4	6,4	0,000137	0,003127	0	0	0	2,49	0	43,62	0	0	0	0,022321	0	0	0,93298	-0,79466	8,006593
6	10/25/2016	La Virgen (MQ-11)	8,58	26,8	2,26	0	215,9	256,5	103	50	25,3	5,5	4,4	12,9	0,000433	0	0	0	0	1,98	0	141,8	0	0	0	0,005451	0,068	0	2,246879	-2,38729	3,029901
7	10/26/2016	San Antonio (SANT)	7,66	26,8	1,71	0	204	216,4	115	89	10,5	4,4	8,3	21,8	0	0	0	0	0	3,57	0	125,4	0	0	0	0,004656	0,024	0	2,339977	-2,16949	3,780726
8	10/25/2016	Gallito (MQ-22)	6,7	27,3	1,73	0	137,8	101,7	77	52	9,6	3,1	4,9	12,9	0,000849	0,0993	0	0	0	2,07	3,45	80,57	0	0	0	0,002243	0,021	0	1,471898	-1,45856	0,455034
10	10/25/2016	Vasconia (VASC)	6,33	26,6	1,94	0	98,8	234,3	28	22	6,9	3,2	1,5	6,4	0	0	0	0	0	1,94	0	61,18	0	0	0	0,005606	0	0	0,824755	-1,0648	12,70385
11	NA	Cobano (SJ-10)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	10/26/2016	Las Nubes (MQ-15)	7,89	27,2	0,18	0	216	-47,9	129	77	19,5	7,8	7,8	17,7	0,000309	0,000218	0	0	0	1,86	0	59,37	0	0	0	0,003604	0,025	0	2,572672	-1,03258	42,71821
13	10/26/2016	Cristo Rey (MQ-19)	7,46	28	0,6	0	161,8	-84,3	73	22	21,4	2,3	1	7,3	0,000178	0,00411	0	0	0	1,74	0	139,3	0	0	0	0,013346	0,084	0	1,436223	-2,33863	23,90569
14	10/25/2016	Santa Cecilia (MQ-12)	8,28	27,6	4,46	0	218,9	87,9	124	81	14,3	4,4	5,4	23,4	0,004362	0,003986	0	0	0	1,82	0	99,3	0	0	0	0,003007	0,1677	0	2,346526	-1,68567	16,38952